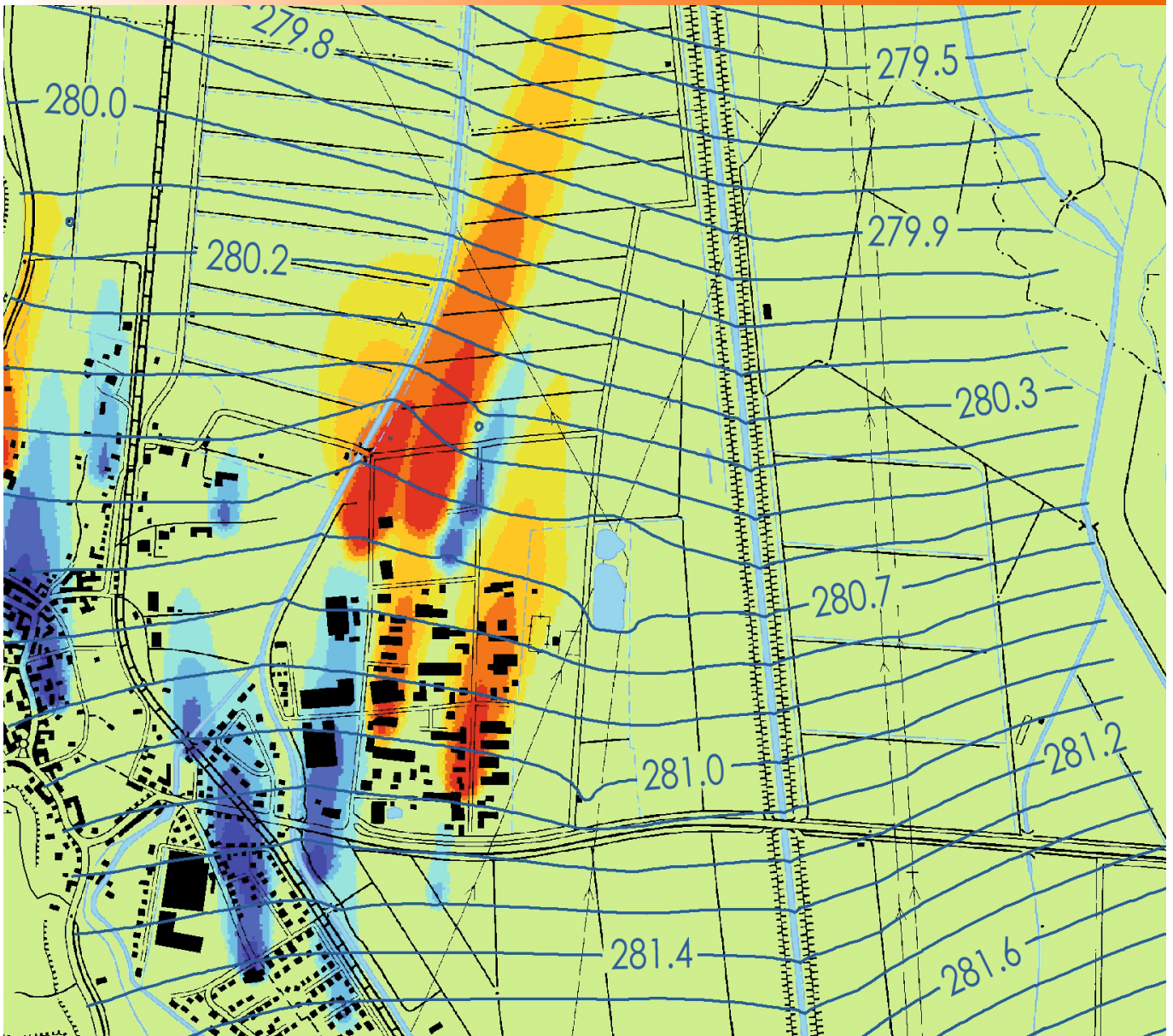


Arbeitshilfe zum Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen



 für Ein- und Zweifamilienhäuser oder Anlagen
mit Energieentzug bis zirka 45.000 kWh pro Jahr.

(Stand: Oktober 2009)



Baden-Württemberg

UMWELTMINISTERIUM

Inhaltsübersicht

1 Einführung.....	4
2 Wärmepumpenkreisläufe.....	5
3 Erläuterungen der hydrogeologischen Rahmenbedingungen	7
4 Temperatur des Grundwassers	9
5 Grundwasserbeschaffenheit	10
5.1 ANFORDERUNGEN AN DIE WÄRMEPUMPENANLAGE	11
5.2 ANFORDERUNGEN AN DIE BRUNNENANLAGE	12
6 Wiedereinleitung des thermisch veränderten Grundwassers	15
7 Auswirkungen einer Entnahme und Wiedereinleitung.....	18
7.1 HYDRAULISCHE AUSWIRKUNGEN	18
7.2 THERMISCHE AUSWIRKUNGEN.....	19
8 Grundlagen zur Berechnung von Temperaturfeldern.....	20
8.1 PROZESSE DES GRUNDWASSERWÄRMEHAUSHALTES	20
8.2 ZUSAMMENWIRKEN DER WÄRMETRANSPORTPROZESSE	23
9 Methoden zur Berechnung von Temperaturfeldern im Grundwasser	25
9.1 TEMPERATURFELD FÜR DEN LASTFALL „JAHRESMITTELWERT“	27
9.2 TEMPERATURFELD FÜR DEN LASTFALL „WINTERBETRIEB“	28
9.3 BEKANNTE SONDERFÄLLE.....	29
9.4 NUMERISCHE RECHENVERFAHREN MIT WÄRMESPEICHERUNG UND KONDUKTION	31
9.5 GENAUIGKEIT VON TEMPERATURFELDBERECHNUNGEN	32
9.6 CHECKLISTE DER EINGANGSPARAMETER FÜR TEMPERATURFELD- BERECHNUNGEN	32
10 Beispiel für eine Temperaturfeldberechnung.....	34
11 Literaturhinweise (Auswahl).....	42
Impressum	47

VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tabelle 1: Durchlässigkeitswerte und daraus abgeleitete Erfahrungswerte zur Ergiebigkeit der wichtigsten Porengrundwasserleiter in Baden-Württemberg

Tabelle 2: Gegenüberstellung von Porengrundwasserleitern und Kluft- und Karstgrundwasserleitern im Hinblick auf ihre Eignung für die Anlage von Grundwasserwärmepumpen

Tabelle 3: Temperaturzonen im Grundwasser

Tabelle 4: Hydrothermische Eigenschaften des Untergrundes

Tabelle 5: Checkliste für Eingangsparameter der Temperaturfeldberechnung

Tabelle 6: Heizungsseitige Vorgaben für den geplanten Anlagenbetrieb

Tabelle 7: Geplante Leistungsdaten der Anlage

Tabelle 8: Hydraulische Berechnung von Entnahme- und Rückgabeparabel

Tabelle 9: Eingangsparameter der Temperaturfeldberechnung im Beispiel

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Titelseite: Modellhaft berechnete Temperaturfelder für mehrere Ein- und Zweifamilienhäuser sowie größere Temperaturfelder gewerblicher Nutzungen (Heizzwecke: Temperaturfahnen in blauen Farben; Kühlwasserfahnen: gelbe und rote Farben); Bildvorlage: Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH, graphisch überarbeitet: RPF-LGRB; Kartengrundlage: Topographische Karte 1:25.000 © Landesvermessungsamt Baden-Württemberg vom 8.8.2008, AZ. 2851.2-D/6592

Abbildung 1: Wärmepumpenzwischenkreisläufe

Abbildung 2: Ganglinien der Grundwassertemperatur in unterschiedlich tiefen Grundwassermessstellen eines oberflächennah liegenden Kluft- und Karstgrundwasserleiters

Abbildung 3: Beispiel für hydrochemische Anforderungen eines Wärmepumpenherstellers

Abbildung 4: Bilder von Kamerabefahrungen in Brunnen

Abbildung 5: Flächenhafte Darstellung der Eisengehalte im Grundwasser

Abbildung 6: Prinzipskizze einer Rigole

Abbildung 7: Prinzipskizze eines Versickerungsschachts

Abbildung 8: Längsdispersivität als Funktion der Längenskala des Ausbreitungsvorgangs


Abbildung 9: Schema zur Wärmeleitung durch Temperaturunterschiede

Abbildung 10: Schemaskizze des Aquifers (nicht maßstäblich)


Abbildung 11: Dokumentation des Pumpversuchs

Abbildung 12: Temperaturfeldberechnung für die 1°C, 2°C und 3°C-Isothermen


1 Einführung

 Der Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen (www.erdwaerme.baden-wuerttemberg.de) beschreibt in komprimierter Form die Möglichkeiten und Rahmenbedingungen zur Nutzung des Grundwassers als Wärmequelle unter Berücksichtigung des Grundwasserschutzes. Die Arbeitshilfe ist eine Ergänzung zum Leitfaden und gibt vertiefende Hinweise und Beschreibungen zu den einzelnen Kapiteln des Leitfadens. Darüber hinaus wird in der Arbeitshilfe ein vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung der Temperaturfelder für Rückgabeburgen vorgestellt und mit einer Beispielrechnung erläutert.

Die Arbeitshilfe ist für die zuständigen Verwaltungsbehörden, Interessierte und Betreiber im Internet unter www.um.baden-wuerttemberg.de, **Publikationen, Geothermie und Grundwasserschutz** veröffentlicht.

Es ist beabsichtigt, auch zukünftig Erfahrungen aus der Anwendung der Grundwasserwärmepumpentechnologie und der Temperaturfeldberechnung zu sammeln und die Arbeitshilfe fortzuschreiben und mit neuem Stand wieder zu veröffentlichen. 

2 Wärmepumpenkreisläufe

 Eine Wärmepumpenanlage besteht aus zwei Kreisläufen:

Kreislauf 1: Kältemittelkreislauf in der Wärmepumpe

Kreislauf 2: Heizkreislauf

Der Wärmepumpenzwischenkreislauf ist ein optionales zusätzliches Modul einer Grundwasserwärmepumpenanlage, das die Brunnenanlage vom Wärmepumpenkreislauf trennt (Abbildung 1). Als Wärmeträgermedium des Zwischenkreislaufs werden Wasser und Mischungen aus Wasser und Solen verwendet.

Ein besonderer Typ des Zwischenkreislaufs ist der mit reinem Wasser gefüllte Spiralwärmetauscher, der in den Brunnen eingehängt wird (Abbildung 1).

In Wasserschutzgebieten (Zone III B) dürfen Grundwasserwärmepumpenanlagen nur mit Zwischenkreislauf betrieben und als Betriebsmittel darf nur Wasser verwendet werden.

Ein Zwischenkreislauf weist bei bestimmten hydrogeologischen Randbedingungen sowie aus Sicht der Wartungsfreundlichkeit deutliche Vorteile auf.

Vorteile eines Zwischenkreislaufs sind neben dem Schutz des Grundwassers auch der Schutz der Grundwasserwärmepumpe vor Alterung und damit verbunden längeren Wartungsintervallen, verbesserte Wartungsfreundlichkeit und eine längere Lebensdauer der Wärmepumpe. Nachteile sind eine zusätzliche Temperaturspreizung (d.h. zusätzliche Temperaturverluste) sowie zusätzliche Investitions- und Betriebskosten (u. a. zusätzliche Umwälzpumpe).

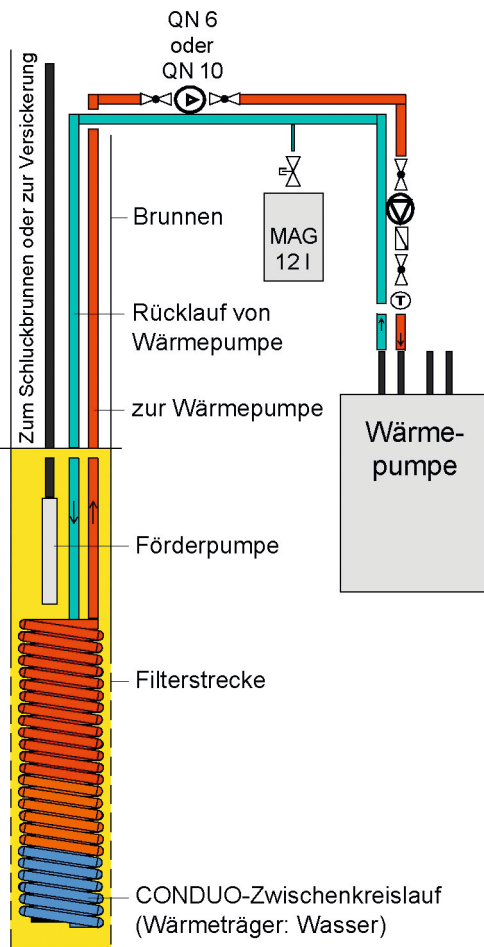


Abbildung 1: Wärmepumpenzwischenkreisläufe



obere Reihe links: gelötete Trennwärmetauscher; unten: zwischen Brunnen und Wärmepumpe im Heizbetrieb;
oben: zwischen Brunnen und Heizungssystem im Kühlbetrieb.

obere Reihe rechts: geschraubter Trennwärmetauscher; isolierte Leitungsrohre, mit „Wärmequellenmodul“, bestehend aus Sole für den Zwischenkreislauf, Solepumpe, Luftabscheider und Druckausgleichsbehälter (Bildquellen: Schott Elektrotechnik – Heizungstechnik, Schallstadt)



untere Reihe links: Schema des CONDUO-Zwischenkreislaufs

untere Reihe rechts: Photo sowie Vergrößerung des Spiralwärmetauschers (Bildquellen: Fa. MHK, Waghäusel, leicht verändert)

3 Erläuterungen der hydrogeologischen Rahmenbedingungen

Die Einsatzmöglichkeiten von Grundwasserwärmepumpenanlagen für Ein- und Zweifamilienhäuser sowie Anlagen mit Entzugsleistungen bis ca. 45.000 kWh pro Jahr sind maßgeblich von den hydrogeologischen Rahmenbedingungen abhängig.

DURCHLÄSSIGKEIT VON PORENDRUNDWASSERLEITERN

Die meisten Anlagen wurden bisher dort gebaut, wo oberflächennahe Porengrundwässer mit einer für den Anlagenbetrieb geeigneten Ergiebigkeit und Beschaffenheit vorhanden sind. Eine Übersicht zu den Durchlässigkeiten und daraus abgeleiteten potenziellen Ergiebigkeiten für die wichtigsten Porengrundwasserleiter in Baden-Württemberg ist in der Tabelle 1 enthalten. Die großen Standardabweichungen bei den Durchlässigkeitswerten weisen darauf hin, dass die hydrogeologischen Verhältnisse bedeutenden Variationen unterliegen, die im Einzelfall im Hinblick auf den geplanten Anlagenbau zu überprüfen sind.

Die Bewertung der Ergiebigkeiten in der Tabelle 1 stützt sich auf die Transmissivität, dem Produkt aus Grundwassermächtigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit, einem hydraulischen Parameter, der durch Pumpversuche und hydraulische Tests ermittelt wird.

Tabelle 1: Durchlässigkeitswerte und daraus abgeleitete Erfahrungswerte zur Ergiebigkeit der wichtigsten Porengrundwasserleiter in Baden-Württemberg (aus: RPF-LGRB, 2008)

HYDROGEOLOGISCHE EINHEIT	DURCHLÄSSIGKEIT k_f				POTENZIELLE ERGIEBIGKEIT
	n	$\lg(x_g)$ [m s ⁻¹]	x_g [m s ⁻¹]	$\lg(s_g)$ [m s ⁻¹]	
Quartäre Kiese und Sande im Oberrheingraben	402	-2,8	$1,59 \cdot 10^{-3}$	0,61	sehr hoch bis hoch
Fluvioglaziale Kiese und Sande im Alpenvorland	217	-2,87	$1,35 \cdot 10^{-3}$	0,89	mittel bis sehr hoch
Jungquartäre Flusskiese und Sande	190	-3,09	$8,13 \cdot 10^{-4}$	0,92	mäßig bis hoch

n Stichprobenumfang; Anzahl der k_f -Werte

x_g geometrischer Mittelwert

s_g geometrische Standardabweichung

\lg Logarithmus zur Basis 10

ERSCHLIESSUNG UND NUTZUNG TIEF LIEGENDER PORENGRUNDWASSERLEITER

In Einzelfällen werden auch tiefe Grundwässer in Porengrundwasserleitern erschlossen. Aufgrund der hohen Erschließungskosten ist dies aber nur dort wirtschaftlich, wo intensive thermische Nutzung für ganzjährige Heizung und Kühlung oder in Kombination mit großer Kühllast vorgesehen sind. Bei der Nutzung tiefer Grundwässer müssen insbesondere Einschränkungen aus wasserwirtschaftlicher Sicht sowie konkurrierende Nutzungen (z.B. Mineral- und Heilwässer, Grundwasserförderung für Brauereien und Lebensmittelbetriebe) berücksichtigt werden.

NUTZUNG VON KLUFT- UND KARSTGRUNDWASSERLEITERN


Nur mit Einschränkungen geeignet sind Kluft- und Karstgrundwasserleiter für die Gewinnung von Grundwasser für Grundwasserwärmepumpenanlagen, da hier hohe Risiken hinsichtlich Fündigkeit und schnellem thermischem Kurzschluss beim Anlagenbetrieb bestehen. Die wesentlichen Unterschiede zwischen Poren- und Kluftgrundwasserleitern hinsichtlich der Grundwasserförderung für Grundwasserwärmepumpenanlagen sind in der Tabelle 2 zusammengefasst. 

Tabelle 2: Gegenüberstellung von Porengrundwasserleitern und Kluft- und Karstgrundwasserleitern im Hinblick auf ihre Eignung für die Anlage von Grundwasserwärmepumpen

PORENGRUNDWASSERLEITER	KLUFT-/KARSTGRUNDWASSERLEITER
In Porengrundwasserleitern fließt das Grundwasser im Porensystem des Korngerüsts. Die wasserwegsam Hohlräume sind trotz sedimentologisch bedingter regionaler Unterschiede vergleichsweise homogen im Gestein verteilt. Das Fündigkeitsrisiko ist entsprechend gering.	In Kluft-/Karstgrundwasserleitern fließt das Grundwasser auf unregelmäßig im Gestein verteilten Klüften bzw. Karsthohlräumen. Nur wenn diese angebohrt werden, kann in der Regel eine ausreichende Brunnenenergiebigkeit erreicht werden. Das Fündigkeitsrisiko ist entsprechend hoch. Gleichzeitig steigt das Risiko von Kurzschlussströmungen zwischen Entnahme- und Rückgabebrunnen.
Die oft geringe Inhomogenität des Gebirges erlaubt eine Verallgemeinerung von Untersuchungsergebnissen, z. B. zur Durchlässigkeit, auf größere Gebirgsbereiche. Der Erkundungsaufwand kann dann vergleichsweise gering gehalten werden. Bei sehr wechselhaften Ablagerungsbedingungen (z.B. glazifluviatile Sedimente) oder kleinräumigen Sedimentschüttungen können auch große Inhomogenitäten bestehen.	Aufgrund der großen Inhomogenität des Gebirges lassen sich Untersuchungsergebnisse nicht ohne weiteres auf benachbarte Bereiche übertragen. Der Erkundungsaufwand ist entsprechend groß und muss individuell für jeden einzelnen Standort betrieben werden.
Der Flurabstand in Porengrundwasserleitern beträgt oft nur wenige Meter. Der Erschließungsaufwand (Bohrtiefen) und auch die Förderhöhen beim Betrieb der Anlage sind entsprechend klein.	In Kluft-/Karstgrundwasserleitern sind Flurabstände von mehr als 10 m keine Seltenheit. Im Oberjura der Schwäbischen Alb und im Nordschwarzwald sind Flurabstände bis über 80 m bekannt. Damit ergeben sich ein großer Erschließungsaufwand (große Bohrtiefen) und große Förderhöhen.
Das durchflusswirksame Porenvolumen der Porengrundwasserleiter liegt im Mittel etwa bei 15 %. Daraus resultieren große Grundwasservolumen, die auch in Trockenzeiten noch eine ausreichende Grundwassermächtigkeit und Ergiebigkeit garantieren. Die saisonalen Grundwasserstandsschwankungen sind gering (meist Dezimeter bis wenige Meter) und bedeuten ganzjährig gleiche Förder- und Einleitungsbedingungen.	Kluft-/Karstgrundwasserleiter besitzen ein 5 bis 10 mal kleineres speicherwirksames Hohlraumvolumen als Porengrundwasserleiter. Dies führt zu großen saisonalen Veränderungen des gespeicherten Grundwasservorrats, die sich in großen Grundwasserstandsschwankungen (bis 20 m und mehr) manifestieren. Die beständige Ergiebigkeit eines Förderbrunnens ist dadurch nicht in allen Fällen gewährleistet und die Förder- und Einleitungsbedingungen zeigen große jahreszeitliche Variationen.

4 Temperatur des Grundwassers

Die Temperatur des Grundwassers ändert sich mit zunehmender Tiefe. Oberflächennah dominieren die Einflüsse aus der Atmosphäre, mit zunehmender Tiefe wird die Gebirgstemperatur als Folge des terrestrischen Wärmestroms maßgebend beeinflusst. Die Gliederung in drei Temperaturzonen ist in der Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Temperaturzonen im Grundwasser

ZONE	DOMINIERENDER EINFLUSS	CHARAKTERISTISCHES MERKMAL IM GRUNDWASSERLEITER
(zirka Tiefenbereich unter Gelände)		
OBERE ZONE (bis 15 m)	durch atmosphärischen Temperatureintrag geprägt	saisonale Temperaturschwankungen
ÜBERGANGSZONE (10 bis 40 m)	sowohl durch mittlere Jahreslufttemperatur beeinflusst als auch durch terrestrischen Wärmestrom	keine saisonalen Temperaturschwankungen; die Grundwassertemperatur wird maßgeblich von der Höhenlage über NN bestimmt
TIEFE ZONE (größer 40 m)	ausschließlich Einfluss des terrestrischen Wärmestroms	Zunahme der Temperatur mit der Tiefe entsprechend der geothermischen Tiefenstufe

Im Rahmen der Messnetze für Umweltmessungen durch die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) wird z.T. auch die Temperatur des oberflächennahen Grundwassers gemessen. Für den Leitfaden wurden die in zweimonatigen Abständen durchgeführten Messungen der Grundwassertemperatur an 330 landesweit verteilten Messstellen ausgewertet.

Die Messergebnisse lassen überregional unterschiedliche oberflächennahe Grundwassertemperaturen erkennen.

Die beobachtete Verteilung spiegelt im Wesentlichen die Reliefverhältnisse wider (siehe Abb. 5 im Leitfaden). In Ballungsgebieten können z.B. durch Abwärme aus Kanalisation und Kellerräumen die Grundwassertemperaturen erhöht sein (in Einzelfällen bis ca. 16 °C). In Stadtgebieten kann im oberflächennahen Grundwasser im Mittel von einer um etwa 1 °C erhöhten Grundwassertemperatur gegenüber dem Umland ausgegangen werden.

Die Grundwassertemperaturen an einem Standort können deutlichen saisonalen Schwankungen unterliegen, die dann bei der Planung von Grundwasserwärmepumpen in flachen Grundwasserleitern mit geringem Grundwasserflurabstand besonders zu beachten sind (Abbildung 2).

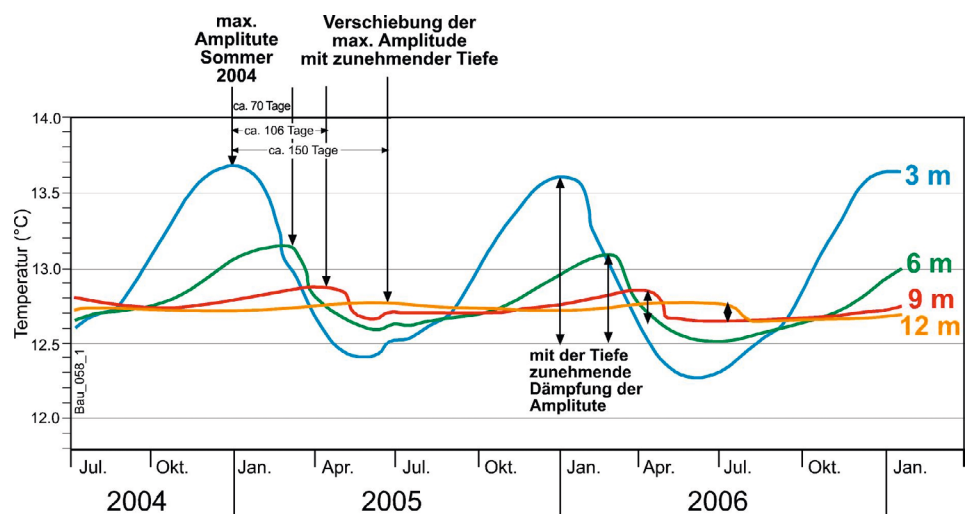


Abbildung 2: Ganglinien der Grundwassertemperatur in unterschiedlich tiefen Grundwassermessstellen eines oberflächennah liegenden Kluft- und Karstgrundwasserleiters (erschlossene Tiefen: 3, 6, 9 und 12 m; RPF-LGRB, Archivunterlagen)

5 Grundwasserbeschaffenheit

Die Grundwasserbeschaffenheit kann innerhalb eines Aquifers räumlich und zeitlich variieren und sich auch mit der Tiefe verändern. Da die Beschaffenheit des zur geothermischen Nutzung vorgesehenen Grundwassers maßgeblichen Einfluss auf Bau, Betrieb und Lebensdauer einer Grundwasserwärmepumpenanlage haben kann, sollten die Konzentrationen der relevanten Wasserinhaltsstoffe bekannt sein. Die Grundwasserproben sind durch ein Fachlabor zu entnehmen, damit es zu keiner probenahmebedingten Veränderung des Wassers kommt.

Die folgenden hydrochemischen Eigenschaften können für die Grundwasserwärmepumpenanlage zu Problemen führen:

- Kohlendioxidreiche, mineralarme und saure Grundwässer, wie sie typischerweise in Kristallin- oder Buntsandsteingebieten (Schwarzwald, Odenwald) auftreten, aber auch hochkonzentrierte chloridreiche Grundwässer besitzen eine korrosive Wirkung für Metalle, da sich in Rohrleitungen keine Schutzschichten bilden können.
- Schwebstoffe im Grundwasser können von einem unsachgemäßen Ausbau des Förderbrunnens oder einer ungenügenden Brunnenentwicklung herrühren. Sie können zu Verstopfungen und nachfolgendem Defekt des Wärmetauschers führen.
- Trübstoffe können auch in reduzierten, sauerstoffarmen Grundwässern mit hohen Konzentrationen an gelöstem Eisen und Mangan auftreten. Kommt solches Grundwasser in der Grundwasserwärmepumpenanlage mit Luft in Kontakt, ändern sich die Milieubedingungen (Lösung von Sauerstoff) und Eisen- und Manganverbindungen fallen aus. Die Folge ist eine frühzeitige Alterung und Verockerung der Anlage und damit eine geringere Lebensdauer.
- Ähnliche Probleme entstehen in stark organisch belasteten Grundwässern. Auch hier können sich bei Luftkontakt Ausscheidungen bilden, die zu einer vorzeitigen Alterung der Anlage führen.
- In Grundwässern mit hoher Gesamthärte, die meist in Zusammenhang mit hohen Sulfatgehalten auftreten, besteht die Gefahr, dass Kalzit ausfällt und Anlagenteile überkrustet, besonders bei der Nutzung der Anlage für Kühlzwecke.
- Ein hoher Gehalt an gelösten Mineralien im Grundwasser begünstigt die Korrosion verschiedener Metalle einer Anlage durch Bildung einer elektrolytischen Spannungsreihe.
- Auch eine einmalige Grundwasseranalyse bei Inbetriebnahme des Brunnens kann keine Garantie für einen langfristigen störungsfreien Betrieb geben. Wenn keine Erkenntnisse über langjährige Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit vorliegen, ist es empfehlenswert, eine Indirektnutzung mit Zwischenkreislauf zu planen.

5.1 ANFORDERUNGEN AN DIE WÄRMEPUMPENANLAGE

Die Wasserqualität muss in jedem Einzelfall den Anforderungen des Wärmepumpenherstellers im Hinblick auf die Materialaggressivität (z.B. für Edelstahl, Kupfer) sowie den einwandfreien Betrieb der Wärmepumpe und der dazu gehörigen Kreisläufe entsprechen. Wenn Grenzwerte nicht eingehalten werden, kann eine Direktnutzung des Grundwassers nicht empfohlen werden. Zur Erhöhung der Betriebsicherheit der Wärmepumpe und Erleichterung der Wartungsarbeiten wird dann die Planung einer Indirektnutzung mittels Zwischenkreislauf empfohlen.

Beständigkeit von Edelstahl (1.4401) und Kupfer gegenüber Inhaltsstoffen/Eigenschaften des Wassers

Inhaltsstoff	Konzentration mg/Liter	Edelstahl	Kupfer
↑ unter normalen Umständen gute Beständigkeit ⇔ korrosionsgefährdet, besonders, wenn mehrere Stoffe mit ⇔ vorliegen. ↓ nicht geeignet			
Organische Elemente	wenn nachweisbar	↑	⇔
Hydrogencarbonat (HCO ₃ ⁻)	< 70	↑	⇔
	70-300	↑	↑
	> 300	↑	⇔ / ↑
Sulfate (SO ₄ ²⁻)	< 70	↑	↑
	70-300	↑	⇔ / ↓
	> 300	↓	↓
Hydrogencarbonat (HCO ₃ ⁻)/ Sulfate (SO ₄ ²⁻)	< 1,0	↑	⇔ / ↓
	> 1,0	↑	↑

Inhaltsstoff	Konzentration mg/Liter	Edelstahl	Kupfer
↑ unter normalen Umständen gute Beständigkeit ⇔ korrosionsgefährdet, besonders, wenn mehrere Stoffe mit ⇔ vorliegen. ↓ nicht geeignet			
Ammoniak (NH ₃)	< 2	↑	↑
	2-20	↑	⇔
	> 20	↑	↓
Chloride (Cl ⁻ , max. 60 °C)	< 300	↑	↑
	> 300	⇔	⇔ / ↑
Sulfid (SO ₃), freies Chlorgas (Cl ₂)	< 1	↑	↑
	1-5	↑	⇔
	> 5	⇔ / ↑	⇔ / ↓
Eisen (Fe), gelöst	< 0,2	↑	↑
	> 0,2	↑	⇔

Inhaltsstoff	Konzentration mg/Liter	Edelstahl	Kupfer
↑ unter normalen Umständen gute Beständigkeit ⇔ korrosionsgefährdet, besonders, wenn mehrere Stoffe mit ⇔ vorliegen. ↓ nicht geeignet			
Freie aggressive Kohlensäure (CO ₂)	< 5	↑	↑
	5-20	↑	⇔
	> 20	↑	↓
Mangan (Mn), gelöst	< 0,1	↑	↑
	> 0,1	↑	⇔
Aluminium (Al), gelöst	< 0,2	↑	↑
	> 0,2	↑	⇔

Inhaltsstoff	Konzentration mg/Liter	Edelstahl	Kupfer
↑ unter normalen Umständen gute Beständigkeit ⇔ korrosionsgefährdet, besonders, wenn mehrere Stoffe mit ⇔ vorliegen. ↓ nicht geeignet			
Nitrate (NO ₃), gelöst	< 100	↑	↑
	> 100	↑	⇔
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)	< 0,05	↑	↑
	> 0,05	↑	⇔ / ↓

Eigenschaft	Grenzwerte	Edelstahl	Kupfer
↑ unter normalen Umständen gute Beständigkeit. ⇔ korrosionsgefährdet, besonders, wenn mehrere Stoffe mit ⇔ vorliegen. ↓ nicht geeignet			
Gesamthärte	4,0-8,5 °dH	↑	↑
pH-Wert	< 6,0	⇔	⇔
	6,0-7,5	⇔ / ↑	⇔
	7,5-9,0	↑	↑
	> 9,0	↑	⇔
elektrische Leitfähigkeit	< 10 µS/cm	↑	⇔
	10-500 µS/cm	↑	↑
	> 500 µS/cm	↑	↓

Hinweis

Die vorstehenden Tabellen sind nicht vollständig und dienen lediglich als Orientierungshilfe.

Abbildung 3: Beispiel für hydrochemische Anforderungen eines Wärmepumpenherstellers (aus: Viessmann Werke GmbH & Co KG, D-35107 Allendorf/Eder, Planungsanleitung Wärmepumpensysteme, www.viessmann.de)

Anlagendefekte durch Schwebstoffpartikel können durch einen sachgerechten Brunnenausbau, eine ausreichende Entsandung und eine regelmäßige Reinigung der Anlage (Schmutzfilter, Plattentaucher) vermieden werden. Bei Einbau eines geschraubten Plattenwärmetauschers im Zwischenkreislauf sind Kontrollen auf Ablagerungen in den Leitungen sowie Wartungs- und Reinigungsarbeiten möglich.

Um eine schnelle Alterung/Korrosion der Anlage zu vermeiden, sind korrosionsbeständige Materialien (Edelstahl, Kunststoff) für den Brunnenausbau und Leitungen notwendig. Anlagenstörungen durch physikalisch-chemische Stoffausfällungen in der Anlage können durch Förderung und Wiedereinleitung des Grundwassers in einem geschlossenen Kreislauf unter Druck minimiert werden, weil dadurch eine Belüftung des Grundwassers oder dessen Entgasung verhindert bzw. zumindest stark eingeschränkt wird.

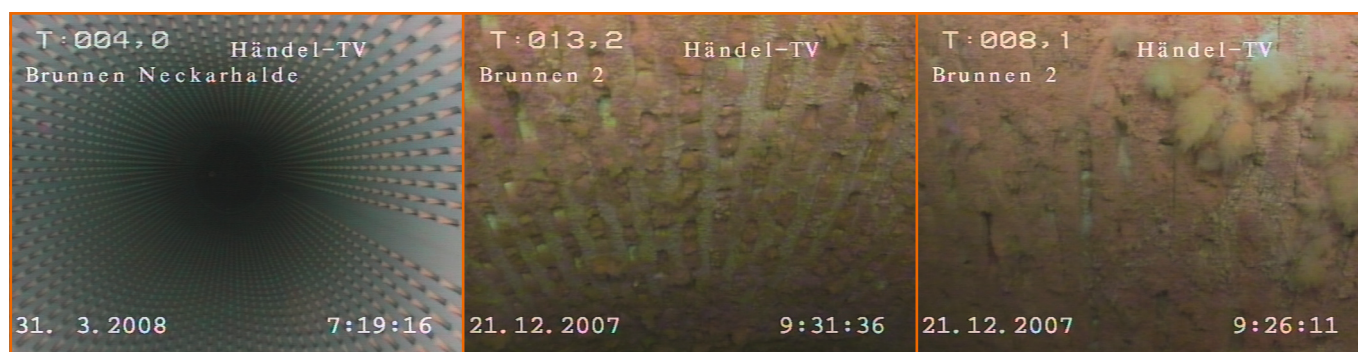
Ab Höhenunterschieden zwischen dem Hochpunkt der Anlage und dem Grundwasserstand der Wiedereinleitung von etwa 7 m kann es zu Unterdruck im Leitungssystem kommen und es können Entgasungseffekte im Grundwasser auftreten.

Hindernisse in der Leitung (z. B. wechselnde Rohrdurchmesser, Armaturen) sollten so weit wie möglich vermieden werden, da sie Stoffausfällungen begünstigen können.

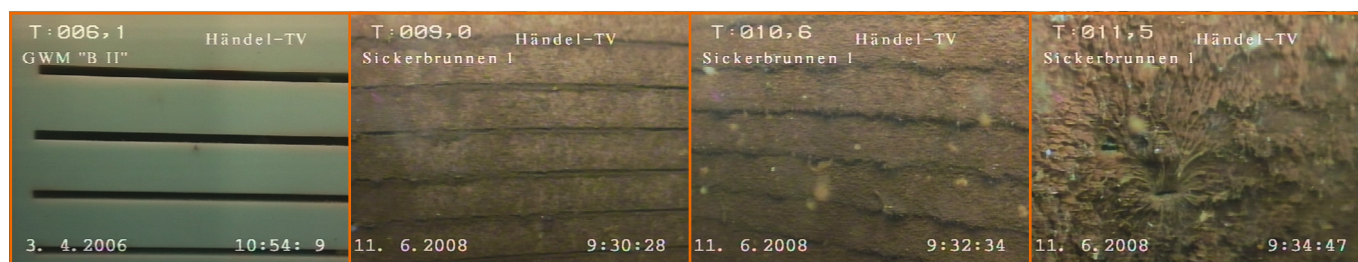
5.2 ANFORDERUNGEN AN DIE BRUNNENANLAGE

Die sog. Brunnenalterung, bei der die technische Ergiebigkeit eines Brunnens zurückgeht (Zunahme des Brunnenverlustes, vgl. Abbildung 4), entsteht durch Ausfällung von Kalk, Verockerung mit Eisen-Mangan-Oxiden/Hydroxiden und mikrobiologischen Ablagerungen besonders im Bereich der Brunnenfilter.

Abbildung 4: Bilder von Kamerabefahrungen in Brunnen (Bildquelle: Firma Händel, Geophysikalische Bohrlochmessungen und Brunnen-TV, Ubstadt-Weiher)



obere Reihe: links: intakter Brunnenfilter ohne Ablagerungen, mitte: stark zugesetzter Brunnenfilter, rechts: Detailausschnitt mit Algen- und Bakterienwachstum im Brunnen



untere Reihe: links: Detailausschnitt eines sauberen Brunnenfilters, mitte: zunehmende Verkeimung und Verockerung eines Brunnenfilters, rechts: Detailblick auf massiven Biofilm auf Brunnenfilter

Insbesondere Rückgabeburgen sind sehr anfällig für solche Prozesse, die bei entsprechenden hydrochemischen Milieubedingungen innerhalb von Monaten bis wenigen Jahren zur vollständigen Abdichtung eines Brunnens führen können, mit der Konsequenz, dass eine Wiedereinleitung von Grundwasser nicht mehr möglich ist.

Ausfällungen im Rückgabeburgen kann durch eine Abdeckung des Brunnens und Wiedereinleitung deutlich unterhalb des Grundwasserspiegels entgegen gewirkt werden.

Sauerstoffarme Milieuverhältnisse treten in vielen Grundwasserleitern auf, so dass Verockerungsprozesse in Brunnen oft nicht vermeidbar sind. Somit gilt es primär, diese Prozesse abzuschwächen und möglichst zeitlich zu strecken. Erfahrungsgemäß sind Grundwässer mit Eisenkonzentrationen von $> 0,1 \text{ mg l}^{-1}$ und Mangankonzentrationen von $> 0,05 \text{ mg l}^{-1}$ als kritisch anzusehen. Jedoch können die beschriebenen Fällungsprozesse auch bei niedrigeren Eisen- und Mangangehalten mehr oder weniger schnell ablaufen.

Einen groben Überblick über die an einem geplanten Standort zu erwartende Grundwasserbeschaffenheit gibt der Atlas des Grundwasserzustandes in Baden-Württemberg (LFU 2001, siehe Abb. 5 für den Parameter „Eisen“).

Um festzustellen, ob solche Prozesse mittelfristig zu erwarten sind, ist eine standortspezifische hydrochemische Bestandsaufnahme zu empfehlen.

Um eine Brunnenalterung zu erkennen, sind regelmäßige, z.B. monatliche Messungen des Ruhewasserspiegels und des Betriebswasserstandes im Entnahme- und Rückgabebrunnen erforderlich. Hierfür ist ein Peilrohr oder eine Druckmesseinrichtung einzubauen. Bei der Beurteilung der Messwerte müssen natürliche Grundwasserstandsschwankungen berücksichtigt werden.

Ist ein Brunnen einmal verockert oder durch Kalk und organische Ablagerungen verstopft, muss er regeneriert werden. Der Einsatz chemischer Reinigungsmittel (z.B. zur Säuerung und Desinfektion) erfordert eine wasserrechtliche Erlaubnis.

Alternativ können reduzierte Grundwässer auch über entsprechend ausgeführte Sickerpackungen und Rigolen wieder in den Grundwasserleiter zurückgeführt werden. Diese Sickeranlagen können jedoch auch verockern. 🐾

Eisen

Medianwerte 1990-1999

Datenbasis und Verfahren

2847 Messstellen, davon 2552 mit Median > Bestimmungsgrenze

Simple Updating Kriging

Gruppierung Landnutzung / Geologie

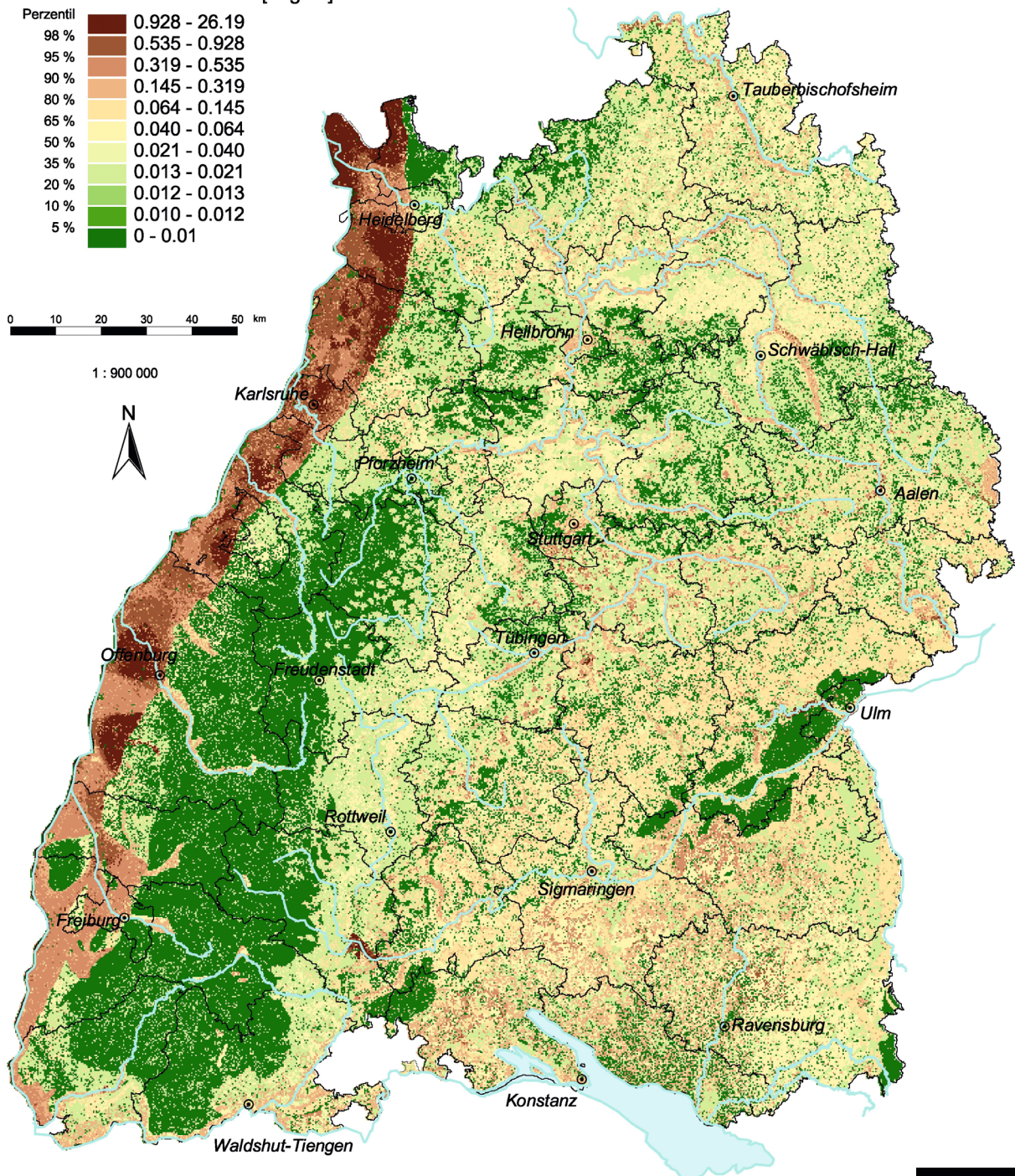
Erwartungswert

von ... bis unter ... [mg / l]

Perzentil	von ... bis unter ... [mg / l]
98 %	0.928 - 26.19
95 %	0.535 - 0.928
90 %	0.319 - 0.535
80 %	0.145 - 0.319
65 %	0.064 - 0.145
50 %	0.040 - 0.064
35 %	0.021 - 0.040
20 %	0.013 - 0.021
10 %	0.012 - 0.013
5 %	0 - 0.01

0 10 20 30 40 50 km

1 : 900 000



Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg



Abbildung 5: Flächenhafte Darstellung der Eisengehalte im Grundwasser (aus: LFU, 2001)

6 Wiedereinleitung des thermisch veränderten Grundwassers

Die technischen Anforderungen zum Bau von Rückgabebrunnen sind vergleichbar mit den Anforderungen an Entnahmebrunnen (siehe Regelwerke). Da die maximale Aufstauhöhe in Rückgabebrunnen oft begrenzt ist, müssen sie ausreichend, d.h. meist größer und tiefer als die Entnahmebrunnen dimensioniert werden.

Bei geringen Flurabständen des Grundwassers und Rückleitung des Grundwassers bis unter den Grundwasserstand im Rückgabebrunnen muss die Förderpumpe praktisch nur die leitungsbedingten Druckverluste überwinden. Die physikalische Grenze hierfür wird etwa bei einem Hochpunkt von 7 m über dem Grundwasserstand des Rückgabebrunnens erreicht. Bei Rückgabe des Grundwassers über Sickeranlagen kann dieser Effekt nicht oder nur eingeschränkt genutzt werden.

Wenn eine Verockerung des Brunnens zu erwarten ist, sollte eine gute Zugänglichkeit für Reinigungsmaßnahmen gegeben sein.

ANFORDERUNGEN AN SICKERANLAGEN

Sickeranlagen haben einen größeren Platzbedarf als Schluckbrunnen und müssen für einen eventuellen späteren Austausch der Sickerpackung gut zugänglich sein.

Im Rahmen des Wasserrechtsantrags ist nachzuweisen, dass:

- die notwendigen hydraulischen Randbedingungen gegeben sind (z.B. Durchlässigkeit des Untergrunds),
- ein ausreichender Mindestabstand zur benachbarten Bebauung eingehalten wird (siehe Regelwerke) und durch die Wiedereinleitung Nachbargrundstücke nicht beeinträchtigt werden,
- die Anlage richtig dimensioniert ist (siehe Regelwerke),
- die Versickerung unter der belebten Bodenzone mit Abschluss zur Atmosphäre erfolgt
- und das rückzugebende Grundwasser direkt vertikal in den genutzten Grundwasserleiter sickern kann; hierzu ist gegebenenfalls durch Erkundungsbohrungen festzustellen, ob unterhalb der Eingabestelle bindige Deckschichten vorhanden sind, die eine vertikale Versickerung erschweren und einen lateralen schwebenden Grundwasserabfluss bewirken könnten.

Nicht zulässig sind Versickerungsmulden, da hier die Gefahr besteht, dass diese verschlammen und damit unwirksam werden und überlaufen.

Ebenfalls nicht zulässig ist der Einbau eines Überlaufs in Oberflächengewässer oder die Kanalisation, außer die zuständige Untere Wasserbehörde stimmt dem ausdrücklich zu. In diesen Fällen erfolgt keine oder nur eine Teilrückgabe des thermisch genutzten Grundwassers in den Grundwasserleiter.

Für die Dimensionierung und Planung von Versickerungsanlagen in der ungesättigten Bodenzone (d.h. oberhalb des Grundwassers) kann das DWA Regelwerk Arbeitsblatt A138, Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser, herangezogen werden. Abweichend von diesem Regelwerk sollte die Rückleitung von Grundwasser in geschlossenen Rohrsystemen möglichst tief in das Versickerungsbauwerk erfolgen.

RIGOLENVERSICKERUNG

Ein unterirdischer Graben (Rigole) wird mit einem sehr gut durchlässigen Material wie z.B. Kies gefüllt. Zur besseren Verteilung wird ein perforierter Rohrstrang mit eingelegt und die Anlage dann mit Bodenmaterial geländegleich abgedeckt. Es empfiehlt sich, zur Kontrolle dem Rohr-Rigolensystem einen Kontroll- und Absetzschacht mit tagwasserdichter Schachtabdeckung vorzuschalten und die Zulaufleitung bis zur Schachtsohle zu führen (Abb. 6).

Die Versickerungsleistung Q_s kann wie folgt näherungsweise berechnet werden (DWA-A 138):

Gleichung 1:

$$Q_s = \left(b_R + \frac{h_R}{2} \right) \cdot l_R \cdot \frac{k_f}{2}$$

Q_s : Versickerungsleistung [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]

b_R : Breite der Rigole [m]

h_R : Höhe der Rigole [m]

l_R : Länge der Rigole [m]

k_f : Durchlässigkeit des an der Rigolensohle anstehenden Bodenmaterials [m s^{-1}]

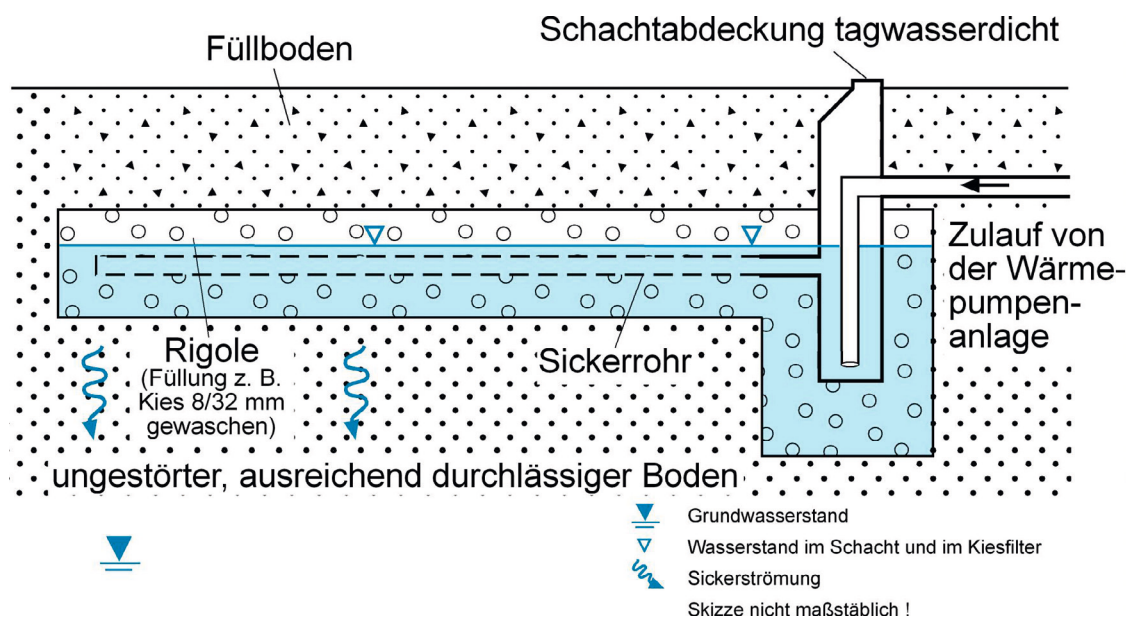


Abbildung 6: Prinzipskizze einer Rigole (Schacht und Rigole nicht maßstäblich)

SCHACHTVERSICKERUNG

Ein Versickerungsschacht (vgl. Abbildung 7) wird i. d. R. aus Betonschachtringen mit einem Mindestdurchmesser von DN 1000 aufgebaut. Sie sind im Versickerungsbereich perforiert und werden mit durchlässigem Filterkies ummantelt. Der oberste Meter sollte jedoch zur Abdichtung zur Oberfläche mit dem örtlichen Bodenmaterial verfüllt und der Schacht tagwasserdicht verschlossen werden.

In erster Näherung kann die Versickerungsleistung eines Schachts mit folgender Formel berechnet werden (abgeleitet aus DWA-A 138):

Gleichung 2:

$$Q_s = \left(\frac{h_s}{2} \cdot \pi \cdot d_s + \frac{d_s^2}{4} \cdot \pi \right) \cdot \frac{k_f}{2}$$

Q_s : Versickerungsleistung [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]

d_s : Durchmesser des Schachtes [m]

h_s : maximale Aufstauhöhe im Schacht [m]

k_f : Durchlässigkeit des anstehenden Bodenmaterials [m s^{-1}]

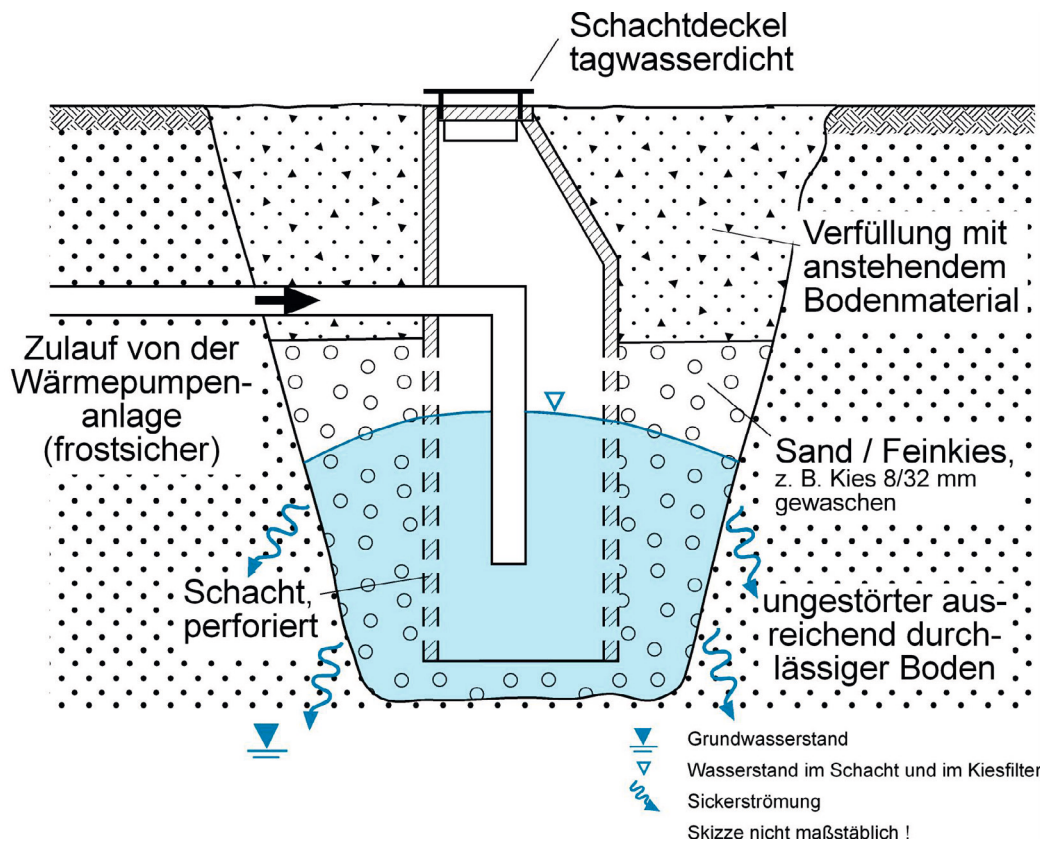



Abbildung 7: Prinzipskizze eines Versickerungsschachts

7 Auswirkungen einer Entnahme und Wiedereinleitung

7.1 HYDRAULISCHE AUSWIRKUNGEN

 Für Anlagen zur Beheizung und Kühlung von Ein- und Zweifamilienhäusern werden im Durchschnitt Brunnenergiebigkeiten von wenigen Litern pro Sekunde ($l\ s^{-1}$) benötigt, da die Anlagen im Intervallbetrieb mit bedarfsorientierter hoher Entnahme und nicht im Dauerbetrieb mit gleichmäßiger geringer Entnahme laufen. Zur Beurteilung der hydraulischen Auswirkungen von Grundwasserentnahmen und -rückgaben ist die Durchführung von Pump- und Injektionsversuchen erforderlich. Eine ausreichende Brunnenergiebigkeit sollte durch einen mindestens 24-stündigen Pumpversuch im Förder- oder Versuchsbrunnen nachgewiesen werden. Der Pumpversuch ist von einem Fachbüro zu planen, nach den Regeln der Technik auszuführen und auszuwerten. Zu ermitteln sind Transmissivität, Durchlässigkeit und Ergiebigkeit.

Neben den hydraulischen Kenngrößen liefern Pump- und Injektionsversuche Hinweise auf die Leistungsfähigkeit und das Absenkungsverhalten eines Brunnens und zeigen, ob ein ordnungsgemäßer Anlagenbetrieb möglich ist. Sie dienen zusätzlich der Beweissicherung, falls es zu späteren Veränderungen der Anlage (z.B. Brunnenalterung) oder der Zustromverhältnisse kommt.

Pumpversuche können die vor dem Dauerbetrieb zwingend notwendige Entsandung eines Brunnens nicht ersetzen, sondern höchstens unterstützen!

Neben klassischen Auswerteverfahren für Pumpversuche (z.B. DVGW ARBEITSBLATT W111, GEOLOGISCHES LANDESAMT 1994) stehen heute auch moderne computergestützte Auswertemethoden zur Verfügung. Grundsätzlich ist zu empfehlen, auch das Wiederanstiegsverhalten nach der Förderphase mit zu beobachten und auszuwerten. Während eines Pumpversuchs sollte der Schluckbrunnen mit beobachtet werden.

Grundsätzlich sind kombinierte Pump- und Schluckversuche zu empfehlen. Hierbei darf nur Grundwasser in Trinkwasserqualität oder das aus dem Entnahmebrunnen entnommene Wasser genutzt werden, sofern es keine schädlichen Verunreinigungen enthält.

Werden Versickerungsanlagen getestet, die in die ungesättigte Bodenzone infiltrieren und kann der Wasserstand in diesen Anlagen nur unzureichend beobachtet werden, muss zunächst das Speichervolumen der Anlage aufgefüllt werden, bevor die für den Dauerbetrieb entscheidende Versickerungsleistung bestimmt werden kann.

Während der Pump- und Schluckversuche müssen die Absenkungen bzw. Aufhöhungen des Wasserstandes in angepassten Abständen gemessen und dokumentiert werden, so dass eine Auswertung der Messdaten möglich ist.

Die Förder- oder Wiedereinleitungsraten sind hierbei mit einer einwandfrei funktionierenden Wasseruhr oder

geeigneten Durchflussmessern zu bestimmen. Auch hier sollten von Zeit zu Zeit Kontrollmessungen, z. B. mit Eimer und Stoppuhr erfolgen. Pumpversuchsbegleitende Messungen, z.B. der physikalisch-chemischen Leitparameter wie Temperatur, Leitfähigkeit, pH-Wert und Sauerstoffgehalt sind sehr zu empfehlen.

Ist der Abstand zwischen Entnahme- und Rückgabebrunnen nicht zu groß, sind nur geringe hydraulische Auswirkungen zwischen der Förder- und Rückgabeeinrichtung zu erwarten, da sich der Absenktrichter und die Aufhöhung des Grundwasserspiegels durch die Grundwasserrückgabe wieder ausgleichen. Der Abstand zwischen den Brunnen muss allerdings groß genug sein, um einen thermischen Kurzschluss zu vermeiden.

7.2 THERMISCHE AUSWIRKUNGEN

Die wesentlichen Prozesse des Grundwasserwärmehaushaltes und die praktische Berechnung von Temperaturfeldern sind in Kapitel 8 näher beschrieben. Für Grundwasserwärmepumpenanlagen von Ein- und Zweifamilienhäusern mit Entzugsleistungen bis ca. 45.000 kWh werden die Berechnungen sehr stark vereinfacht und haben daher zunächst orientierenden Charakter. Primäres Ziel dieser stark vereinfachten Berechnungen ist es, die mögliche Betroffenheit weiterer Nutzer erkennen zu können.

Die hier vorgestellten Verfahren zur Berechnung von Temperaturfeldern im Grundwasser (Kap. 8) gehen auf WILLIBALD (1980), MEHLHORN (1982) und KOBUS (1992) zurück. Im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg wurde das analytische Berechnungsverfahren aufgegriffen, modifiziert und für charakteristische hydrogeologische Situationen sowie den typischen Umfang der thermischen Nutzung von Grundwasser für Ein- bis Zweifamilienhäuser überprüft (KUP, 2008). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen liegen dem Leitfaden zugrunde und können unter www.um.baden-wuerttemberg.de, Publikationen, Geothermie und Grundwasserschutz abgerufen werden.

Ein weiteres einfaches Verfahren zur Berechnung von Temperaturfeldern hat der Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV) entwickelt (ÖWAV-Regelblatt 207-2 „Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds, Heizen und Kühlen“). Es verwendet zur Berücksichtigung der dispersiven Vermischung und hydrologisch bedingten Änderungen der Grundwasserfließrichtung einen Öffnungswinkel. Als Erfahrungswert für den Öffnungswinkel wird ein Bereich von 5 bis 15° genannt; eine nähere Eingrenzung erfolgt nicht. Die Temperaturentwicklung wird gleichbleibend über das gesamte Jahr berechnet. Dies entspricht einem Dauerbetrieb der Anlage mit mittlerer Leistung. Eine Lastfallberechnung für die Wintermonate, in denen Anlagen saisonal bedingt höhere Leistungen aufweisen, ist nicht vorgesehen.

Ist eine weiter gehende Beschreibung eines Temperaturfeldes erforderlich, z.B. wenn die orientierende Berechnung eine mögliche thermische Beeinflussung eines Unterliegers ergeben hat, müssen einerseits die hydraulischen Eigenschaften am Standort detaillierter erfasst werden, andererseits können weitere Prozesse des Grundwassertemperaturhaushaltes berücksichtigt werden (z.B. Wärmeaustausch an der Basis des Temperaturfeldes nach unten und/oder Wärmeaustausch mit der Oberfläche). Die verwendeten Prozesse und Kenngrößen müssen dann fachlich begründet werden.

Hierzu müssen oftmals zusätzliche Messungen vor Ort durchgeführt werden, die zeit- und kostenintensiv sind, da in der Regel keine entsprechend dichten Messnetze zur Klärung solcher Detailfragen vorhanden sind. Komplexere Temperaturfeldberechnungen können nur mit numerischen Verfahren durchgeführt werden. 🐾

8 Grundlagen zur Berechnung von Temperaturfeldern

8.1 PROZESSE DES GRUNDWASSERWÄRMEHAUSHALTES

Die Strömungsverhältnisse in einem Grundwasserleiter werden durch hydrologische (Grundwasserneubildung aus Niederschlag, Uferfiltration) und hydrogeologische Randbedingungen bestimmt (z.B. Verbreitung, Mächtigkeit, Durchlässigkeit, Porosität des Grundwasserleiters, Spannungszustand des Grundwassers). Zur Quantifizierung der Strömungsverhältnisse wird in den gängigen Anwendungen meist die Darcy- Gleichung herangezogen. Je nach Komplexität der natürlichen Verhältnisse stehen zur Berechnung der Strömungs- und Wärmetransportverhältnisse vereinfachende analytische Berechnungsansätze und numerische Methoden zur Verfügung.

Bei der Wärmeausbreitung in Grundwasserleitern sind grundsätzlich folgende Mechanismen beteiligt:

- Ausbreitung mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch hydrodynamische Dispersion
- Wärmeaustausch mit der Atmosphäre
- Wärmespeicherung im System grundwassererfüllter Porenraum / Korngerüst (bei instationärer Betrachtung der Ausbreitungsvorgänge)
- Wärmeaustausch an den Flanken und an der Sohle des Temperaturfelds (Konduktion)

KONVEKTION

Als Konvektion wird die Ausbreitung des Wärmeinhalts mit dem durch die Abstandsgeschwindigkeit charakterisierten Geschwindigkeitsfeld bezeichnet. Dichteeffekte oder die Änderung der Viskosität spielen bei den hier relevanten Entnahme- und Temperaturverhältnissen keine wesentliche Rolle.

HYDRODYNAMISCHE DISPERSION

Die hydrodynamische Dispersion beschreibt Vermischungsvorgänge, die durch Fließgeschwindigkeitsunterschiede in den Porenräumen des Untergrunds, durch kleinräumige Inhomogenitäten des Korngerüsts und durch makroskopische Inhomogenitäten des Untergrunds entstehen (SÖLL 1988, RAUSCH et al. 2005). Die Dispersion ist richtungs- und entfernungsabhängig. Die größte Dispersion tritt in Fließrichtung auf; die Querdispersion ist vergleichsweise etwa um den Faktor 5-10 kleiner, die vertikale Dispersion meist sehr klein (RAUSCH et al. 2005).

Beim Wärmetransport in dem hier betrachteten Maßstab ist die Dispersion ein relevanter Prozess, da in den üblichen oberflächennahen Fließsystemen in Baden-Württemberg Abstandsgeschwindigkeiten von 1 Meter pro Tag bis mehrere 10er Meter pro Tag auftreten. Dies führt zu Längenausdehnungen von Temperaturfahnen (bezogen auf die 1 K-Isotherme) von zirka 10 m bis einige 100 m. Die durch den Porenraum bedingte Dispersion

wird von Vermischungseffekten als Folge makroskopischer Inhomogenitäten stark überlagert.

Zur rechnerischen Beschreibung der Dispersion dient die Dispersivität. Je größer dieser Parameter, umso stärker ist die Vermischung (vgl. Tab. 5).

Wenn für eine Temperaturfeldberechnung keine konkreten Erkundungsergebnisse zur Dispersion vorliegen, kann diese anhand der Abbildung 8 abgeschätzt werden. Hierbei ist die Dispersivität in Abhängigkeit von der Längsausdehnung des zu betrachtenden Ausbreitungsproblems zu wählen.

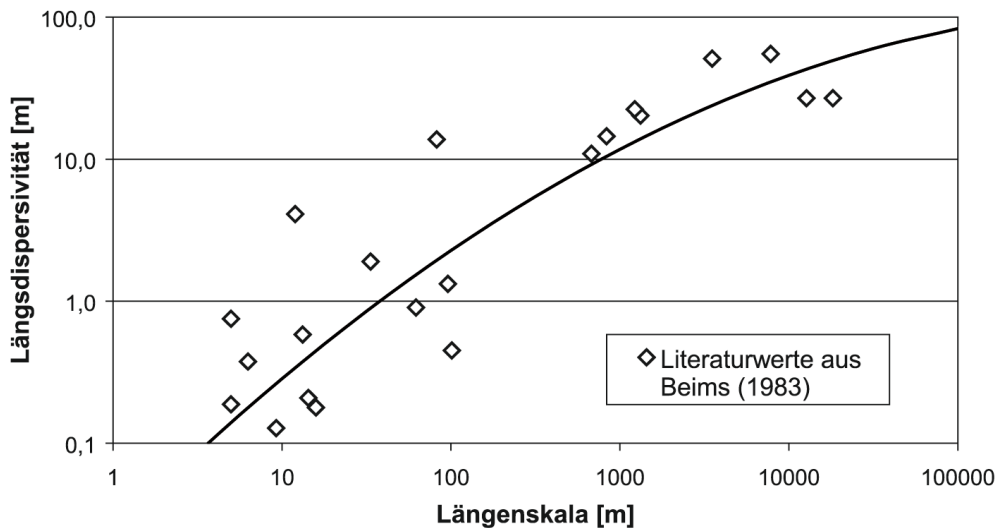


Abbildung 8: Längsdispersivität als Funktion der Längenskala des Ausbreitungsvorgangs (aus: RAUSCH et al. 2005, redaktionell verändert, KUP 2008)

WÄRMEAUSTAUSCH MIT DER ATMOSPHÄRE

Sonneneinstrahlung und Einsickerung von Niederschlagswasser sind wichtige Quellterme in der Energiebilanz des oberflächennahen Grundwassers. Bei den hier betrachteten Temperaturfeldern für Entzugsleistungen bis ca. 45.000 kWh a⁻¹ können diese Prozesse vernachlässigt werden, da der Austausch mit der Atmosphäre insbesondere in der Hauptbetriebszeit einer Grundwasserwärmepumpenanlage für Heizzwecke im Winter wegen der niedrigen Außentemperaturen nicht stattfinden kann. Ferner wäre zu hinterfragen, ob dieser Prozess in z.B. dicht besiedelten Gebieten mit den üblichen Zahlenwerten für die Wärmeleitfähigkeit überhaupt zutreffend parametrisiert wird.

Der Austausch mit der Atmosphäre ist allerdings bei regionalen thermischen Bewirtschaftungsfragen ein wichtiger und nicht zu vernachlässigender Prozess (z.B. CATHOMEN 2002).

WÄRMESPEICHERUNG

Die Wärmeausbreitung wird ferner durch die Fähigkeit des Untergrundes, Wärme zu speichern und zu leiten, beeinflusst. Hierbei sind das Grundwasservolumen und das Gesteinsvolumen gesondert zu berücksichtigen.

Bei der Wärmeausbreitung im Untergrund gleicht sich die Temperatur des Gesteins relativ schnell der des fließenden Wassers an. Dabei ist zu beachten, dass dem relativ kleinen Wasservolumen (bei Porengrundwasserleitern: ca. 15 %) ein relativ großes Gesteinsvolumen gegenüber steht (bei Porengrundwasserleitern: ca. 85 %).

KONDUKTION

Die Konduktion beschreibt die Wärmeübertragung als Funktion der Wärmeleitfähigkeit. Konduktive Prozesse können in einem Temperaturfeld lateral als auch vertikal in Richtung der Atmosphäre oder zum Liegenden hin stattfinden.

Eine Zusammenstellung von Kennwerten für die spezifische Volumenwärme und die Wärmeleitfähigkeit zeigt, dass diese für verschiedene Gesteine erheblich schwanken (Tabelle 4).

Tabelle 4: Hydrothermische Eigenschaften des Untergrundes

KENNWERTE	WASSER	GESTEIN
Volumenbezogene spezifische Wärmekapazität [MJ K ⁻¹ m ⁻³]	4,2	1 - 2,5
Wärmeleitfähigkeit [J s ⁻¹ K ⁻¹ m ⁻¹]	0,6	0,4 - 4,1

Einheiten: MJ = Megajoule, J = Joule, K = Kelvin (0 °C = 273 K; Δ1 °C = Δ 1K)

Umrechnung Watt/Joule: 1 Joule = 1 Watt · 1 Sekunde

die Wärmeleitfähigkeit kann auch in der alten Einheit [W · m⁻¹ · K⁻¹] angegeben werden

Die spezifische Volumenwärme ist definiert als das Produkt aus spezifischer Wärmekapazität und Dichte. Der Wärmehalt eines bestimmten Stoffvolumens errechnet sich wie folgt:

Gleichung 3:

$$\Delta E = \rho \cdot c \cdot V \cdot \Delta T$$

- ΔE = Änderung des Wärmehalts [J]
- c = spez. Wärmekapazität [J kg⁻¹ K⁻¹]
- ρ = Dichte [kg m⁻³]
- V = Volumen [m³]
- ΔT = Änderung der Temperatur [K]

Mit Gleichung 3 kann z.B. errechnet werden, welcher Wärmehalt durch diesen Prozess im Gestein gespeichert wird. Bei einer gemeinsamen Betrachtung des Wärmehalts von Gestein und Grundwasser kann die spezifische Volumenwärme des gesättigten Untergrunds über die Gewichtung der Volumenanteile von Wasser und Gestein errechnet werden.

Für die Wärmeleitfähigkeit des gesättigten Untergrunds oder der ungesättigten Bodenzone werden meist so genannte effektive Parameter verwendet. Charakteristische Werte für die Bodenzone liegen bei 1,5 (trockenes Sediment) bis 3 (wassergesättigtes Sediment) [J s⁻¹ K⁻¹ m⁻¹].

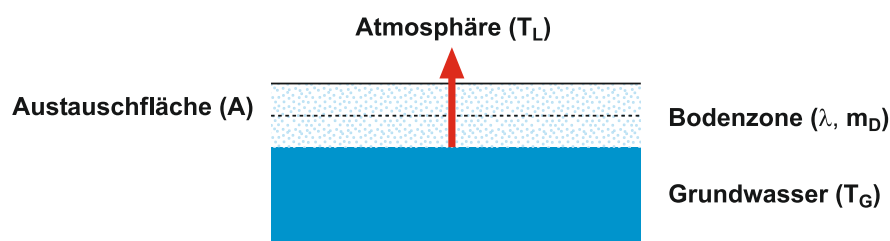


Abbildung 9: Schema zur Wärmeleitung durch Temperaturunterschiede (aus: KUP, 2008)

Unter Verwendung von Gleichung 4 kann der Wärmeaustausch aufgrund eines Temperaturunterschiedes gemäß der in Abbildung 9 dargestellten Konfiguration berechnet werden. Gleichung 4 kann auch dazu verwendet werden, den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre oder bei sinngemäßer Anwendung die Wärmeleitung an den Flanken eines Temperaturfeldes oder zu dessen Liegendem zu quantifizieren.

Gleichung 4:

$$F = A \cdot \lambda (T_G - T_L) / m_D$$

F = Wärmestrom [W]

A = Austauschfläche [m²]

λ = Wärmeleitfähigkeit der ungesättigten Bodenzone [J s⁻¹ K⁻¹ m⁻¹]

T_G = Grundwassertemperatur (an der Grundwasseroberfläche) [°C oder K]

T_L = Lufttemperatur [°C oder K], hier gleich gestellt mit der Temperatur an der Erdoberfläche

m_D = Flurabstand bzw. Mächtigkeit der ungesättigten Bodenzone [m]

8.2 ZUSAMMENWIRKEN DER WÄRMETRANSPORTPROZESSE

Die Ausbreitung von Wärme und der Stofftransport im Grundwasser können grundsätzlich mit vergleichbaren Methoden beschrieben werden.

Konvektion und hydrodynamische Dispersion sind Mechanismen, die die Ausbreitung von Stoffen (Markierungstoffe, Schadstoffe) sowie die Temperatur maßgeblich bestimmen.


Eine Vielzahl von Markierungsversuchen in den quartären Kiesgrundwasserleitern in Baden-Württemberg hat gezeigt, dass die Vermischung durch Dispersion ein wichtiger und relevanter Stofftransportprozess ist, der bei Annahme einer Retardation des Wärmetransports gegenüber dem advektiven Transport eines idealen Tracers in Analogie näherungsweise gegeben ist.

Die Ausbreitung von Wärme wird neben den Stofftransportprozessen noch durch den Wärmeausgleich zwischen Grundwasser und Korngerüst, die Wärmeleitung (Konduktion) und den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre beeinflusst.

Der Wärmeausgleich zwischen dem Grundwasser und dem Korngerüst findet immer statt. Er bedingt zunächst eine langsamere und gedämpfte Ausbreitung einer Wärmefahne gegenüber der konvektiven Ausbreitung („Speichereffekt“). Bei stationären Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass der Austausch zwischen Grundwasser und Korngerüst näherungsweise einen Gleichgewichtszustand erreicht hat. Bei kurzzeitigen Betrachtungen (z.B. Spitzenlastzeiten eines Brunnens) muss der „Speichereffekt“ berücksichtigt werden (d.h. instationäre Betrachtung des Ausbreitungsvorgangs).

Der Beitrag der einzelnen Prozesse zum Wärmetransport hängt maßgeblich von der hydrogeologischen Situation, Art und Umfang der thermischen Nutzung, den Entnahmebedingungen sowie von den zu betrachtenden Raum- und Zeitskalen ab.

Bislang gibt es nur wenige Feldstudien, bei denen die Temperaturausbreitung im Untergrund auch durch Messprogramme dokumentiert wurde. Dabei wurden Reichweiten von Temperaturfeldern in einer Größenordnung von 10er bis einigen 100er Metern ermittelt (z.B. KOBUS, 1992). Temperaturschwankungen

als Folge wechselnder Leistung von thermischen Grundwassernutzungen konnten bis mehrere 10er Meter Entfernung nachgewiesen werden. Dies zeigt, dass bei Temperaturfeldberechnungen nicht nur die langfristige Beeinflussung, die einem Dauerbetrieb der Anlage mit mittlerer Leistung entspräche, sondern auch saisonal bedingte Phasen mit mittelfristig erhöhter Leistung der Anlagen zusätzlich berücksichtigt werden müssen. Kurzfristige Beeinflussungen, die durch den Intervallbetrieb mit einem Wechsel von Phasen mit Maximalleistung der Anlage und Ruhephasen entstehen, können zur Klärung von thermischen Beeinflussungen von Unterliegern in der Regel vernachlässigt werden. 

9 Methoden zur Berechnung von Temperaturfeldern im Grundwasser

Die Berechnung setzt eine plausible hydrogeologische Modellvorstellung voraus und erfolgt unter starker Vereinfachung der hydraulischen und thermischen Vorgänge. Damit werden die tatsächlichen Verhältnisse an einem Standort idealisiert und modellhaft beschrieben und der betroffene Grundwasserleiter wird im Betrachtungsmaßstab als ausreichend homogen und isotrop angesprochen. Diese Vorgehensweise ist nicht zulässig, wenn sehr starke Inhomogenitäten vorliegen (z.B. Zufluss in einen Brunnen aus einer einzigen Kluft). Die Annahme konstanter hydrogeologischer Parameter im Betrachtungsgebiet entspricht der gängigen fachlichen Praxis bei vielen wasserwirtschaftlichen Fragestellungen (z.B. auch bei der Berechnung der 50-Tagelinie für die Ausweisung von Wasserschutzgebieten in Baden-Württemberg).

Vereinfachte Temperaturfeldberechnungen sind immer mit Ungenauigkeiten behaftet, da die zu Grunde liegenden hydrogeologischen Kenndaten in der Regel nicht in der erforderlichen Genauigkeit bekannt sind oder bestimmt werden können. Sie sind jedoch für eine erste Abschätzung geeignet. Im Bedarfsfall sind die Berechnungen auf einer verbesserten Datengrundlage (z.B. besser abgesicherte Pumpversuchsergebnisse, Untersuchungen zur Grundwasserfließrichtung) und unter Berücksichtigung weiterer Wärmetransportprozesse (sofern aus fachlicher Sicht angemessen) durchzuführen.

Die Temperaturveränderungen des Grundwassers werden durch sog. Isothermen (Linien gleicher Temperatur) in Schritten von 1 Kelvin (K) oder 1 °C dargestellt. Die berechneten Temperaturen sind Differenz-Temperaturen zur ungestörten Grundwassertemperatur als Folge der Wärmenutzung des Grundwassers. Wenn sich mehrere Temperaturfelder überlagern, müssen auch Temperaturänderungen kleiner als 1 K berücksichtigt werden.

Der in Kap. 9.1 und 9.2 vorgestellte Berechnungsweg gilt im Wesentlichen für vergleichsweise gut durchlässige Porengrundwasserleiter und damit vergleichbaren Kluftgrundwasserleitern mit relativ hohen Abstandsgeschwindigkeiten, deren thermische Nutzung sich durch einen geringen Energieentzug auszeichnet. Die Fälle mit niedrigen Grundwasserabstandsgeschwindigkeiten sind in Kap. 9.3 abgehandelt.

Temperaturfeldberechnungen gelten für den Anteil an Energie, der dem Grundwasser entzogen werden soll (Gleichung 5).

Gleichung 5:

$$S = N - E$$

S = Energieentzug aus dem Grundwasser [kWh a⁻¹]

N = gewünschte Nutzenergie bzw. Endenergieverbrauch [kWh a⁻¹]

E = zugeführte (meist) elektrische Energie [kWh a⁻¹]

Der Zusammenhang zwischen dem Umfang der Grundwassernutzung und dem Energieentzug wird beschrieben durch Gleichung 6:

Gleichung 6:

$$Q = S / (c_w \cdot \Delta T \cdot \rho_w)$$

Q	=	Entnahme- bzw. Infiltrationsrate [m ³ s ⁻¹]
S	=	Entzug an Wärmeenergie [W]
c _w	=	spez. Wärmekapazität des Wassers [J kg ⁻¹ K ⁻¹] (ca. 4.180 J kg ⁻¹ K ⁻¹)
ρ _w	=	Dichte des Wassers [kg m ⁻³] (ca. 1.000 kg m ⁻³)
ΔT	=	Temperaturerniedrigung [K]

Für die hier betrachteten Anlagen für Ein- und Zweifamilienhäuser mit Jahresentzugsleistungen von überschlägig 15.000 bis ca. 45.000 kWh a⁻¹ lassen sich damit über das Jahr gemittelte Pumpraten von 0,1 l s⁻¹ bis 0,3 l s⁻¹ errechnen (bei Annahme einer Temperaturspreizung von 4 K; bei geringerer Spreizung: mittlere Förderraten bis zirka 0,5 l s⁻¹).

Die Temperaturfeldberechnungen sind für zwei Lastfälle separat durchzuführen.

1. Lastfall „Jahresmittelwert“
2. Lastfall „Winterbetrieb“

Im Lastfall „Jahresmittelwert“ wird ein Temperaturfeld berechnet, das für die langfristige Beeinflussung entsprechend einem Dauerbetrieb der Anlage unter Annahme einer mittleren Leistung gilt. Da Kühlung meist nur in geringem Umfang erfolgt, soll sie vernachlässigt werden. Die Berechnung gilt für stationäre Verhältnisse (d.h. die Annahme, dass das Temperaturfeld theoretisch seine endgültige Ausdehnung erreicht hat). Bei kartenmäßiger Darstellung des Temperaturfeldes gilt die mittlere Grundwasserfließrichtung; bei größeren Variationen der Grundwasserfließrichtung müssen diese mit berücksichtigt werden.

Die mittlere Entnahmerate, die der Temperaturfeldberechnung zu Grunde liegt, ist deutlich kleiner als die tatsächlich notwendige Förderrate des Brunnens, da dieser meist im Intervallbetrieb läuft. Aufgrund des großen Speichervermögens des Grundwasserleiters gleichen sich die kurzzeitigen Temperaturschwankungen bei intervallartigem Betrieb bereits im näheren Brunnenumfeld wieder aus.

Der Lastfall „Winterbetrieb“ berücksichtigt zusätzlich, dass während der Heizperiode vorübergehend eine vergleichsweise größere saisonale Temperaturbeeinflussung des Grundwassers erfolgt. Für eine vereinfachte Lastfallberechnung können beim Energieentzug näherungsweise der Faktor 2 gegenüber dem Jahresmittelwert und eine Heizdauer von 4 Monaten angesetzt werden. Je nach Planung sind auch andere Lastfallszenarien möglich. Bei großer Kühlanforderung muss das Temperaturfeld gesondert für einen Lastfall „Kühlung“ berechnet werden. Die Lastfallberechnungen gelten für instationäre Betrachtungen und erfordern gegenüber der stationären Betrachtungsweise die Berücksichtigung zusätzlicher Aquiferkennwerte (s.u.).

Die Lastfall-Berechnungen erbringen insbesondere bei hohen Abstandsgeschwindigkeiten ein vergleichsweise längeres und breiteres Temperaturfeld und größere Temperaturschwankungen im näheren Umfeld des Rückgabebrunnens. Die Abweichungen gegenüber Temperaturfeldern für den Jahresmittelwert variieren stark in Abhängigkeit der Randbedingungen (Abstandsgeschwindigkeit, Entnahmerate).

9.1 TEMPERATURFELD FÜR DEN LASTFALL „JAHRESMITTELWERT“

Der Lastfall „Jahresmittelwert“ beschreibt die langfristige Beeinflussung, die sich bei einem Dauerbetrieb einer Anlage unter Annahme einer ganzjährig konstanten Entnahmerate und Spreizung einstellen würde.

Die orientierende Temperaturfeldberechnung geht von einem Grundwasserleiter mit folgenden vereinfachten Randbedingungen aus:

- konstante, mit Grundwasser erfüllte Mächtigkeit,
- einheitliches Grundwassergefälle,
- konstante Durchlässigkeit,
- konstanter transportwirksamer Hohlraumanteil.

Unter diesen idealisierten Verhältnissen stellt sich eine parallele Grundströmung mit einer konstanten Filtergeschwindigkeit ein. Eine Beeinflussung dieser Grundströmung durch den Entnahme- und Rückgäbebrunnen wird vernachlässigt. D.h. weder Absenkungen und Erhöhungen des Grundwasserstandes noch Änderungen der Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten werden berücksichtigt.

Für die Temperaturfeldberechnung wird davon ausgegangen, dass im Ausgangszustand unbeeinflusste und konstante Temperaturen vorherrschen. Der Austausch mit der Atmosphäre sowie konduktive Prozesse werden nicht berücksichtigt.

ANALYTISCHES BERECHNUNGSVERFAHREN FÜR KONVEKTION UND DISPERSION

Die Filtergeschwindigkeit kann mit der Darcy-Gleichung berechnet werden (Gleichung 7).

Gleichung 7:

$$v_f = k_f \cdot I$$

- v_f = Filtergeschwindigkeit [m s⁻¹]
 I = Gradient der Piezometerhöhe, Grundwassergefälle [-]
 k_f = Durchlässigkeit des Grundwasserleiters [m s⁻¹]

Aus der Filtergeschwindigkeit lässt sich die mittlere Abstandsgeschwindigkeit berechnen (Gleichung 8):

Gleichung 8:

$$v_a = v_f / n$$

- v_a = mittlere Abstandsgeschwindigkeit [m s⁻¹]
 v_f = Filtergeschwindigkeit [m s⁻¹]
 n = durchflusswirksamer Hohlraumanteil [-]

Die Temperaturfeldberechnung erfolgt nach WILLIBALD (1980) für den Lastfall „Jahresmittelwert“ mit den Gleichungen 9 und 10. Das Programm kann unter www.um.baden-wuerttemberg.de, **Publikationen, Geothermie und Grundwasserschutz** kostenfrei heruntergeladen werden.

Diese Gleichungen beschreiben das Temperaturfeld einer permanenten punktförmigen Wärmequelle infolge einer konvektiven und dispersiven Ausbreitung. Diese Gleichungen werden auch bei der Auswertung von Markierungsversuchen oder für die Prognose von Schadstoffausbreitungen verwendet.

Gleichung 9:

$$x_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \alpha_T} \left(\frac{Q \cdot \Delta T_E}{m \cdot v_f \cdot \Delta T} \right)^2$$

Gleichung 10:

$$y = \pm \sqrt{4 \cdot \alpha_T \cdot x \cdot \ln \left(\frac{Q \cdot \Delta T_E}{m \cdot v_f \cdot \Delta T \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot \alpha_T \cdot x}} \right)}$$

- x_0 = Abstand der gesuchten Isotherme vom Infiltrationsbrunnen auf der Stromlinie im Abstrom des Rückgabebrunnens [m] (nicht zu verwechseln mit dem Staupunkt oder der unterstromigen Reichweite der Anströmung eines Brunnens, die oft auch mit x_0 bezeichnet werden)
- x = Abstand zum Rückgabebrunnen auf der Stromlinie im Abstrom des Rückgabebrunnens [m]
- y = seitliche Ausdehnung der Isotherme, berechnet als seitlicher Abstand zur Stromlinie für Punkte $x < x_0$; bei x_0 ist $y = 0$; [m]
- α_T = Querdispersivität [m]
- Q = Infiltrationsrate [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]
- m = Grundwassererfüllte Mächtigkeit [m]
- v_f = Filtergeschwindigkeit [m s^{-1}]
- ΔT_E = Unterschied zwischen Einleittemperatur und unbeeinflusster Grundwassertemperatur [K]
- ΔT = Gesuchte Isotherme, als Differenz zur Grundwassertemperatur [K]

Der Berechnungsansatz gilt als Näherung für eine parallele Grundströmung und berücksichtigt nicht Veränderungen der Fließrichtung durch die Grundwasserentnahme- und -rückgabe. Aus diesem Grund gelten die Rechenergebnisse nicht für den unmittelbaren Nahbereich der Infiltration. Die Anwendung des Berechnungssatzes auf größere Pumpraten (z.B. in Folge einer thermischen Nutzung $> 45.000 \text{ kWh pro Jahr}$) oder auf kleine Abstandsgeschwindigkeiten ($< 1 \text{ m/d}$) führt zu unplausiblen Ergebnissen.

9.2 TEMPERATURFELD FÜR DEN LASTFALL „WINTERBETRIEB“

Für den Lastfall Winterbetrieb wird die instationäre Lösung für die Beschreibung des Temperaturfelds einer permanenten punktförmigen Wärmequelle infolge einer konvektiven und dispersiven Ausbreitung verwendet. Analoges gilt auch für den Fall, dass in größerem Umfang mit der Anlage gekühlt wird.

Mit dem Lastfall „Winterbetrieb“ soll geprüft werden, ob sich die saisonal verstärkte Nutzung einer Anlage während der Heizperiode stärker auswirkt als bei Annahme von Jahresmittelwerten (analoges gilt auch für das Kühlen).

ANALYTISCHES BERECHNUNGSVERFAHREN FÜR KONVEKTION UND DISPERSION

Die Berechnungsgrundlage ist im Detail bei KINZELBACH (1987) beschrieben, sie kann in folgender Näherung für Temperaturfeldberechnungen verwendet werden (Gleichungen 11 und 12):

Gleichung 11 und Gleichung 12:

$$\Delta T(x, y, t) = \frac{Q \cdot \Delta T_E}{4 \cdot n_f \cdot m \cdot v_a \cdot \sqrt{\pi \cdot \alpha_T}} \cdot \exp\left(\frac{x - r}{2 \cdot \alpha_L}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{r}} \operatorname{erfc}\left(\frac{r - v_a \cdot t / R}{2 \cdot \sqrt{v_a \cdot \alpha_L \cdot t / R}}\right)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 \frac{\alpha_L}{\alpha_T}}$$

- x, y = Längs- und Querkoordinate [m] (x in Strömungsrichtung, y senkrecht zur Strömungsrichtung)
- t = Zeit seit Beginn der Stoffeinleitung [s]
- Q = Infiltrationsrate [m³ s⁻¹]
- ΔT_E = Unterschied zwischen Einleittemperatur und unbeeinflusster Grundwassertemperatur [K]
- ΔT = Gesuchte Isotherme als Differenz zur Grundwassertemperatur [K] (Unterschied zur unbeeinflussten Grundwassertemperatur)
- n = transport- oder durchflusswirksamer Hohlraumanteil [-]
- m = genutzte grundwassererfüllte Mächtigkeit [m]
- v_a = Abstandsgeschwindigkeit [m s⁻¹]
- α_L = Längsdispersivität [m]
- α_T = Querdispersivität [m]
- R = Retardation [-]
- erfc = komplementäre Fehlerfunktion
- exp = Exponentialfunktion zur Basis e

Für die verstärkte Nutzung während der Heizperiode kann z.B. von einer Verdoppelung der Infiltrationsrate gegenüber der Jahresmittelwertberechnung ausgegangen werden. Als Dauer für die verstärkte Nutzung können z.B. 120 Tage (bzw. 120 • 86400 Sekunden) angesetzt werden. Der Wärmeaustausch Grundwasser - Gestein kann grundsätzlich mit einem Erfahrungswert für die Retardation von R = 3 vereinfachend abgeschätzt werden.

Die Gleichung 11 liefert für große Werte von t (z.B. 10.000 Tage) identische Ergebnisse wie die Lösung in Kapitel 9.1 für stationäre Betrachtungen.

Der Berechnungsansatz gilt als Näherung für eine parallele Grundströmung und berücksichtigt nicht Veränderungen der Fließrichtung durch die Grundwasserentnahme- und -rückgabe. Aus diesem Grund gelten die Rechenergebnisse nicht für den unmittelbaren Nahbereich der Infiltration. Die Anwendung des Berechnungssatzes auf größere Pumpraten (z.B. in Folge einer thermischen Nutzung > 45.000 kWh pro Jahr) oder auf kleine Abstandsgeschwindigkeiten (< 1 m/d) führt zu unplausiblen Ergebnissen.

Die Berechnung ist mit dem Taschenrechner oder computergestützt möglich. Das Programm kann unter www.um.baden-wuerttemberg.de, Publikationen, Geothermie und Grundwasserschutz kostenfrei heruntergeladen werden. Zur Veranschaulichung ist in Kapitel 10 ein Rechenbeispiel dokumentiert.

9.3 BEKANNTE SONDERFÄLLE

Die unter Punkt 9.1 und 9.2 vorgestellten Berechnungsmethoden und gemachten Angaben gelten für die in Baden-Württemberg dominierenden Grundwasserleiter mit Abstandsgeschwindigkeiten im Bereich von einigen Metern pro Tag und den Pumpraten, die sich für thermische Nutzungen von bis zu 45.000 kWh pro Jahr ergeben.

In gut durchlässigen Grundwasserleitern mit sehr niedrigem Fließgefälle können auch Grundwasserabstandsgeschwindigkeiten kleiner als 1 Meter pro Tag auftreten (z.B. bereichsweise im Rheintal zwischen Rastatt

und Mannheim). Unter diesen Randbedingungen berechnen sich Entnahmebreiten der Brunnen, die bereits deutlich übliche Grundstücksgrößen von Ein- und Zweifamilienhäusern überschreiten. Sowohl ein hydraulischer als auch thermischer Kurzschluss zwischen Entnahme- und Rückgabebrunnen werden möglich. Derartige Ergebnisse ergeben sich insbesondere dann, wenn nur vergleichsweise geringmächtige Aquiferabschnitte für die Grundwasserwärmepumpe genutzt werden und diese bei der Berechnung entsprechend angesetzt werden.

Bei sehr niedrigen Abstandsgeschwindigkeiten des Grundwassers berechnen sich nach dem in der Arbeitshilfe unter Punkt 9.1 und 9.2 genannten Berechnungsverfahren extrem große Ausdehnungen der Temperaturfelder, die nur bedingt plausibel sind.

Um mittels vereinfachender Verfahren angepasste Temperaturfelder für diese besonderen Bedingungen zu berechnen, laufen derzeit Untersuchungen, die noch nicht abgeschlossen sind.

Zur vorläufigen Berechnung von Temperaturfeldern unter diesen besonderen Bedingungen, müssen daher im Berechnungsweg einige weitere Vereinfachungen vorgenommen werden. Durch diese Vereinfachungen wird der abschätzende Charakter der Temperaturfeldberechnungen noch verstärkt.

UNVOLLKOMMENER ODER FLACHER BRUNNEN

In Fällen (z.B. im Rheintal), in denen der Rückgabebrunnen nur einen Teil der gesamten Aquifermächtigkeit (als unvollkommener oder flacher Brunnen) nutzt, sollte durch Ermittlung der dreidimensionalen Trennstromfläche des Rückgabebrunnens eine plausible Abschätzung einer Ersatztiefe für den Brunnen vorgenommen werden. Diese Ersatztiefe kann dann für die Temperaturfeldberechnung verwendet werden.

Sofern sich trotz dieser verbesserten Idealisierung der Strömungsverhältnisse des unvollkommenen Rückgabebrunnens weiterhin Entnahmebreiten ergeben, die einige 10-er Meter übersteigen, sollte der vereinfachende Berechnungsansatz unter Annahme einer punktförmigen Wärmequelle nicht verwendet werden.

NIEDRIGE ABSTANDSGESCHWINDIGKEITEN (< 1 m PRO TAG)

Bei niedrigen Abstandsgeschwindigkeiten (< 1 m pro Tag) muss hinterfragt werden, ob der Lastfall „Jahresmittelwert“ mit einem stationären Ansatz zutreffend beschrieben werden kann. Die z. T. extrem großen Temperaturfelder bei niedrigen Abstandsgeschwindigkeiten resultieren daraus, dass rechnerisch sehr lange Laufzeiten (mehrere Jahre) bis Erreichen der Stationarität notwendig sind. In der Realität muss davon ausgegangen werden, dass in solchen Zeiträumen und bei derart großen Flächen stärkere vertikale Temperaturexaustauschprozesse wirksam werden, die zu einer deutlichen Verkleinerung gegenüber dem rein horizontal-ebenen Temperaturfeld führen. In diesen Fällen wird empfohlen, vorläufig instationäre Berechnungen vorzunehmen, und die Berechnungsdauer für den Lastfall „Jahresmittelwert“ auf z.B. 2 Jahre zu begrenzen.

Alternativ können Temperaturfelder unter diesen Randbedingungen gut mit Rechenverfahren abgeschätzt werden, die z.B. die konduktive Wärmeausbreitung nach unten mit berücksichtigen.

Im Rahmen der Fortschreibung der Arbeitshilfe ist vorgesehen, die Gleichung 11 weiter zu entwickeln, um vertikale Austauschprozesse besser zu berücksichtigen.

Auch in gering durchlässigen Grundwasserleitern können sehr niedrige Abstandsgeschwindigkeiten auftreten. Solche Grundwasserleiter können nur dann für Grundwasserwärmepumpenanlagen genutzt werden, wenn vergleichsweise tiefe Brunnen gebaut werden. Solche Fälle sind dann im Einzelfall zu beurteilen.

9.4 NUMERISCHE RECHENVERFAHREN MIT WÄRMESPEICHERUNG UND KONDUKTION

Temperaturfeldberechnungen können bei entsprechender Anpassung auch mit numerischen Transportmodellen durchgeführt werden. Hierbei können die natürliche Grundströmung, Absenktrichter und Aufhöhung des Grundwasserspiegels durch mehrere Entnahme- und Zugabebrunnen sowie räumlich und zeitlich variierende Fließbedingungen berücksichtigt werden.

Dreidimensionale lokale Wärmetransportmodelle sind z.B. geeignet, eine nähere Standortbewertung bei Überschneidung von Temperaturfeldern vorzunehmen, da analytische Rechenverfahren hier an ihre Grenzen stoßen. Komplexe regionale Wärmetransportmodelle sind z.B. für die Erstellung von Wärmelastplänen für Bau- und Siedlungsgebiete oder sehr umfangreiche thermische Grundwasserwärmenutzungen geeignet. Numerische Temperaturfeldberechnungen können auch in stark vereinfachter Form erstellt werden (z.B. als Prinzipmodell für einen Standort). Hierbei ist im Vorfeld zu prüfen, ob

- die in Kap. 8 und 9 der Arbeitshilfe genannten grundsätzlichen Anforderungen erfüllt sind und
- das Modellgebiet ausreichend engmaschig diskretisiert ist, um auch die Längserstreckung von Temperaturfeldern nicht zu überschätzen.

Numerische Rechenverfahren und deren Vergleichbarkeit mit analytischen Verfahren wurden im Detail von KUP (2008) untersucht. Für sechs charakteristische Situationen in Baden-Württemberg und typische Entzugsleistungen für Ein- und Zweifamilienhäuser kann festgehalten werden:

PRINZIPMODELLE

Unter Ansatz plausibler Werte für die Dispersivität liefern Rechenansätze mit Dispersion vergleichbare Werte wie der Rechenansatz mit Konduktion an den seitlichen Flanken des Temperaturfeldes. Der Vergleich erfolgte hier mit dem Rechenprogramm GED von POPPEI et al. (2005, 2006, 2007) für lange Berechnungszeiten, die näherungsweise stationären Betrachtungen gleich gesetzt werden können (Lastfall Jahresmittelwert).

Nur bei extrem großen Abstandsgeschwindigkeiten (z.B. mehr als 20 m pro Tag) liefert der dispersive Ansatz wegen der sehr starken Vermischung erwartungsgemäß kleinere Ausdehnungen der 1 K-Isotherme als der konduktive Ansatz.

WÄRMETRANSPORTMODELLE

Die zusätzliche Berücksichtigung des konduktiven Wärmeaustausches über die Basisfläche des bilanzierten Aquiferabschnitts liefert ein vergleichsweise kleineres Temperaturfeld, da die relativ hohe Wärmeleitfähigkeit des gesättigten Mediums einen effektiven Wärmeaustausch mit dem tieferen Gebirgsbereich ermöglicht.

Die zusätzliche Berücksichtigung der Wärmeleitung an den Flanken eines Temperaturfeldes führt bei Ansätzen, die bereits eine dispersive Quervermischung berücksichtigen, zu keiner merklichen Veränderung des Temperaturfeldes (KUP, 2008). Dies gilt sowohl für stationäre als auch für instationäre Berechnungen.

9.5 GENAUIGKEIT VON TEMPERATURFELDBERECHNUNGEN

Temperaturfeldberechnungen (analytisch und numerisch) weisen eine hohe Sensitivität hinsichtlich der verwendeten hydrogeologischen Parameter auf. Eine zusätzliche Variabilität der Ergebnisse resultiert aus unterschiedlichen Rechenverfahren.

Insgesamt werden aber die Unsicherheiten, die ein Rechenergebnis aufweist, maßgeblich von den angenommenen Randbedingungen (z.B. Annahme einer einheitlichen Durchlässigkeit eines Aquifers), der genauen Grundwasserfließrichtung an einem Standort und der für die Berechnung gewählten Durchlässigkeit bestimmt.

- Die verwendeten hydraulischen Parameter unterliegen erfahrungsgemäß saisonalen und räumlichen Variationen, die oft nicht genau genug bekannt sind.
- Die Verifizierung eines Temperaturfeldes ist nur über Beobachtungen in Messstellen möglich, was bislang nicht bzw. nur in sehr geringem Umfang durchgeführt wurde.

Vereinfachende Temperaturfeldberechnungen, wie sie hier vorgestellt werden, sind daher lediglich eine erste Abschätzung. Da noch keine Senkenterme in der Energiebilanz des oberflächennahen Grundwassers berücksichtigt sind, liefern die Berechnungen konservative Ergebnisse, d.h. die berechneten Temperaturfelder fallen eher etwas zu groß aus.

Eine Verallgemeinerung der Ergebnisse der vereinfachenden Berechnungen oder deren Übertragung auf beliebige andere thermische Nutzungen des Grundwassers ist nicht zulässig.

9.6 CHECKLISTE DER EINGANGSPARAMETER FÜR TEMPERATURFELDBERECHNUNGEN

Um die Unsicherheiten bei der Temperaturfeldberechnung einzugrenzen, werden folgende Mindestanforderungen gestellt:

- Die Eingabeparameter für die Rechenverfahren müssen fachlich begründet und belegt werden, damit Rechenergebnisse nachvollziehbar sind.
- Die berücksichtigten Wärmetransportprozesse müssen benannt und begründet werden. Bei Berechnungen von Temperaturfeldern für Einzelobjekte darf der Wärmeaustausch mit der Atmosphäre nicht berücksichtigt werden.
- Die Berechnungsverfahren und Formeln sind nachvollziehbar darzustellen.
- Die Randbedingungen der Berechnungen sind zu nennen und kurz zu begründen.


Eine Checkliste für die zu verwendenden Eingangsparameter ist in der Tabelle 5 enthalten. 

Tabelle 5: Checkliste für Eingangsparameter der Temperaturfeldberechnung

PARAMETER	HERKUNFT DER RECHENWERTE UND NOTWENDIGE DOKUMENTATION
Entzug an Wärmeenergie aus dem Grundwasser S [kWh a ⁻¹]	Dimensionierung der Heizungsanlage, Angaben der Heizungsbaufirma; siehe auch Gleichung 5
Entnahmerate Q [m ³ s ⁻¹]	vgl. Gleichung 6
Durchlässigkeit k_f [m s ⁻¹]	aus Pumpversuch im Förder- oder Entnahmebrunnen bestimmt (mit nachvollziehbarer Pumpversuchsauswertung; es wird empfohlen, den Rückgabebrunnen als Beobachtungsmessstelle zu nutzen) sowie zusätzlich: Charakteristischer lokaler/regionaler Wert aus regionalen hydrogeologischen Studien, deren Ergebnisse nachvollziehbar und veröffentlicht sind
hydraulischer Gradient i [-] und Grundwasserfließrichtung in Ruhe	aus Grundwassergleichenplan für mittlere Fließverhältnisse und Berücksichtigung von Variationen der Fließrichtung
wirksame Grundwassermächtigkeit m [m]	anhand der Verhältnisse vor Ort zu bestimmen, in den meisten Fällen kann näherungsweise der Profilschnitt zwischen Unterkante Deckschicht und Unterkante Filterstrecke angesetzt werden
durchflusswirksame (effektive) Porosität n [%]	Porengrundwasserleiter, erste Näherung: 15 %, in begründeten Fällen kann hiervon abgewichen werden (Beleg/Dokumentation erforderlich)
Ausgangstemperatur des Grundwassers T [°C oder K]	Messung vor Ort unter Berücksichtigung der lokalen, saisonalen und regionalen Verhältnisse
Querdispersivität* α_T [m]	Aus Erfahrungswerten für das jeweilige Untersuchungsgebiet oder in Abhängigkeit der Ausdehnung des Temperaturfelds L für die 1K Isotherme: L < 50 m, α = 0,1 m 50 m ≤ L < 100 m, α = 0,18 m 100 m ≤ L < 250 m, α = 0,34 m 250 m ≤ L < 500 m, α = 0,62 m 500 m ≤ L < 1000 m, α = 1,0 m
Längsdispersivität α_L [m]	Aus Erfahrungswerten für das jeweilige Untersuchungsgebiet oder näherungsweise α _L = 10 • α _T
Retardation R [-]	Aus Erfahrungswerten für das jeweilige Untersuchungsgebiet oder näherungsweise R = 3 [-]
Konduktion [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Plausibler Wert für die Wärmeleitfähigkeit der Aquifermatrix, z.B. 2 W m ⁻¹ K ⁻¹ (mit Ableitung bzw. Zitat der Datenquelle)

* Da der Zusammenhang zwischen Dispersivität und Längsausdehnung aus Vereinfachungsgründen nur über 5 Klassen approximiert wird, gibt es Konfigurationen, für die keine Übereinstimmung erzielt werden kann. In diesen Fällen soll die Dispersivität so gewählt werden, dass eine möglichst konservative Prognose - d.h. große Fahnenlänge - erfolgt (d.h. Verwendung der kleineren Querdispersivität). Die für die 1 K-Isotherme gewählte Querdispersivität soll auch für die weiteren Isothermen sowie den Lastfall verwendet werden. Das vorgeschlagene Vorgehen basiert auf dem Makrodispersionsansatz mit den Ergebnissen unterschiedlicher Studien. Der Makrodispersionsansatz sieht vor, die Dispersivitäten nicht als Funktion von Materialeigenschaften (z.B. für Sand oder Kies) sondern in Abhängigkeit von der Ausdehnung des zu betrachtenden Ausbreitungsphänomens zu definieren. Hierfür kann ersatzweise die Längsausdehnung der 1 K-Isotherme herangezogen werden.

10 Beispiel für eine Temperaturfeldberechnung

DATEN DER GRUNDWASSERWÄRMEPUMPENANLAGE

Ein Wohngebäude soll nach Komplettsanierung und Erneuerung des Heizsystems mit Geothermie beheizt werden. Die Wahl fiel auf eine Grundwasserwärmepumpenanlage, da am Standort hierfür geeignete hydrogeologische Voraussetzungen bestehen, d.h. durchlässiger und nachhaltig ergiebiger Porengrundwasserleiter mit großer räumlicher Verbreitung und eine für den Anlagenbetrieb geeignete Grundwasserbeschaffenheit.

Table 6: Heizungsseitige Vorgaben für den geplanten Anlagenbetrieb

DAUER MONATE	TÄGLICHER BETRIEB	ZWECK	JÄHRLICHE BETRIEBSSTUNDEN
6	10 Stunden	Heizung	1800
12	1 Stunde	Warmwasserbereitung	365
Summe			2165

Die Anlage soll bedarfsabhängig gefahren werden, d.h. der Energiebedarf berechnet sich aus der Leistung der Anlage (27 kW) und der geplanten Betriebsdauer (2165 Stunden pro Jahr) zu 58455 kWh.

Aus Gleichung 5 der Arbeitshilfe wird ersichtlich, dass nicht der gesamte Energiebedarf aus dem Grundwasser gedeckt werden kann. Für das hier berechnete Beispiel mit einer heizungsseitig geplanten mittleren Leistungszahl von 4 (d.h. das Vierfache der eingesetzten Anschlussleistung wird in nutzbare Wärmeleistung umgesetzt) liegt der geplante Energieentzug aus dem Grundwasser bei 43841 kWh im Jahr ($58455 \cdot 4 \cdot 3$). Zu beachten ist hierbei, dass die technische Leistungszahl der Wärmepumpe nicht der Jahresarbeitszahl entspricht, da letztere zusätzlich die Hilfsaggregate berücksichtigt.

Der geplante Energieentzug aus dem Grundwasser (kWh) kann in eine mittlere Jahresentzugsleistung (kW) umgerechnet werden. Auf dieser Grundlage kann der über das Jahr gemittelte notwendige Grundwasserförderstrom berechnet werden. Zur Abschätzung des Lastfalls „Winter“ wird im Leitfaden ein gegenüber dem Mittelwert verdoppelter Förderstrom angenommen (entspricht 120 volle Heiztage). Für die Lastfallberechnung sind auch andere Annahmen möglich (z.B. Heizdauer 6 Monate bzw. 180 Tage).

TECHNISCHE ANFORDERUNGEN AN DIE BRUNNENANLAGE

Die Anforderungen an Förder- und Schluckleistung der Brunnen ergeben sich aus dem benötigten Volumenstrom der Wärmepumpe gemäß dem technischen Datenblatt des Wärmepumpenherstellers.

Die maximale Ergiebigkeit bzw. das Schluckvermögen der Brunnen muss bei diesem Beispiel nach dem technischen Datenblatt im Winter jeweils bis zu 9,3 m³ pro Stunde (entsprechend 2,6 l s⁻¹) betragen.

Tabelle 7: Geplante Leistungsdaten der Anlage

KENNDATEN DER HEIZUNGSANLAGE			DATENQUELLE/BEMERKUNG
Energiebedarf des Gebäudes	kWh	58455	Berechnung/Auslegung durch Heizungsbaufirma
jährliche Betriebsdauer	h	2165	
Leistung der Wärmepumpe	kW	27	
AUSLEGUNG DER BRUNNENANLAGE			
Leistung der Wärmepumpe	kW	27	Vorgabe durch Wärmepumpenhersteller
Volumenstrom der Wärmequelle (nominal/maximal)	l s ⁻¹ (m ³ h ⁻¹)	1,5 – 2,6 (5,3 - 9,3)	
DATEN FÜR DIE TEMPERATURFELDBERECHNUNG			
Energiebedarf des Gebäudes	kWh	58455	Vorgabe durch Heizungsbaufirma
heizungsseitige mittlere Leistungszahl (Planung)		4	
Anteil des Energiebedarfs aus dem Grundwasser	kWh	43841	berechnet aus Energiebedarf und Leistungszahl
mittlere Entzugsleistung aus dem Grundwasser	kW	5,0	Umrechnung kWh in mittlere Jahresleistung kW
mittlere Temperaturspreizung der Wärmepumpenanlage (geplant)	°C	4	Vorgabe durch Heizungsbaufirma/ Wärmepumpenhersteller
mittlerer Volumenstrom der Wärmequelle (Grundwasser)	l s ⁻¹ (m ³ h ⁻¹)	0,3 (1,08)	Gleichung 6 der Arbeitshilfe (für S ist die mittlere Jahresleistung in [W] einzusetzen (1 J = 1 W s))
jährlicher Grundwasserbedarf	m ³	9461 (1,08 • 24 • 365)	
Volumenstrom der Wärmequelle für den „Lastfall Winter“	l s ⁻¹	0,6	Jahresmittelwert • 2

HYDROGEOLOGISCHE RAHMENBEDINGUNGEN

Das Grundwasser wurde in einem großräumig verbreiteten Porengrundwasserleiter am Rand des Rheintals erschlossen. Unter 5 m gering durchlässigen Deckschichten wurde schwach gespanntes Grundwasser in sandigen Schottern angetroffen (Abbildung 10).

Der Aquifer wurde über eine Bohrstrecke von 10 m im stark kiesigen Abschnitt erschlossen und mittels Brunnen gefasst. Der Brunnen wurde als Bohrbrunnen mit Ausbaudurchmesser von 200 mm erstellt. Der relativ große Brunnendurchmesser hat den Vorteil, dass Absenkungen durch Brunnenverluste minimiert werden, die bei kleinkalibrigen Rammfilterbrunnen oft die Brunneneignigkeit limitieren. Der Ausbau ist unvollkommen, da der Aquifer insgesamt 15-25 m mächtig ist.

Zu den hydrogeologischen Verhältnissen kann im vorliegenden Fall auf veröffentlichte Daten zurückgegriffen werden. Es handelt sich um fluviatile Ablagerungen mit kleinräumig variierender Durchlässigkeit. Aufgrund des zunehmenden Sandgehaltes des Grundwasserleiters ab einer Tiefe von zirka 15 m nimmt dessen Durchlässigkeit mit der Tiefe deutlich ab.

Für einen belastbaren Nachweis der Brunneneigebigkeit am individuellen Brunnenstandort wurden eine orientierende und eine detaillierte Pumpversuchsauswertung durchgeführt.

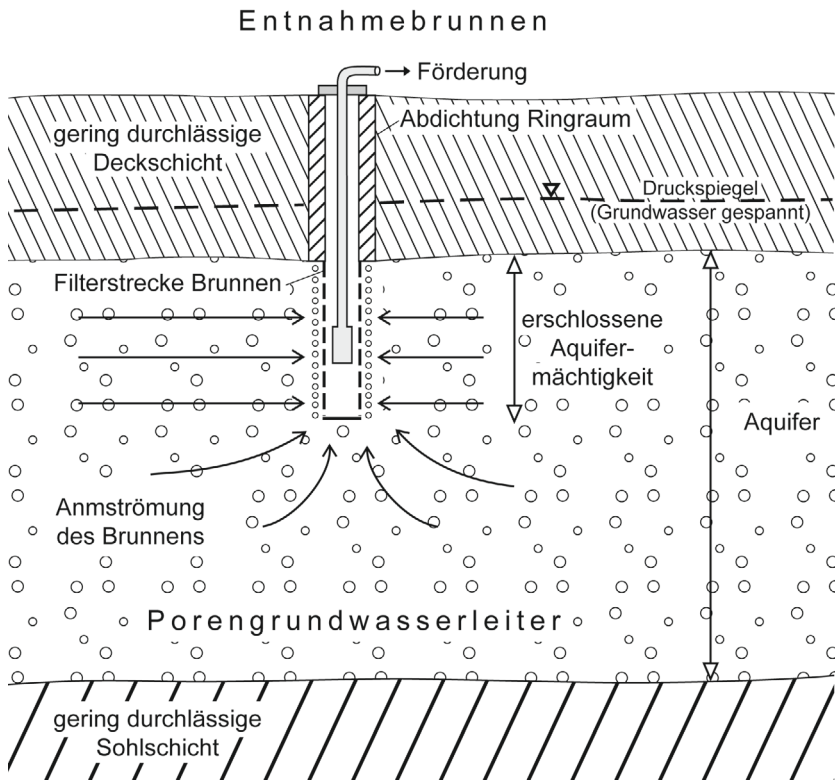


Abbildung 10: Schemaskizze des Aquifers (nicht maßstäblich)

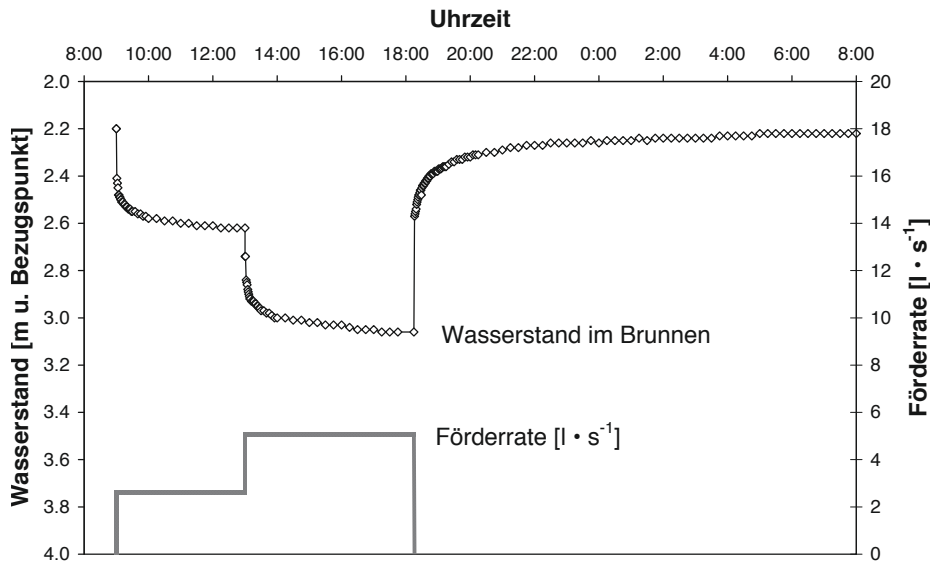
PUMPVERSUCH

Nach Abschluss der Brunnenbauarbeiten wurde im Brunnen ein mehrstündiges Entsandungs- und Klarpumpen durchgeführt. Nach längeren Förderzeiten mit jeweils 1 und 4 Liter pro Sekunde wurden quasi gleich bleibende Absenkungen von 0,15 m und 0,68 m beobachtet und notiert.

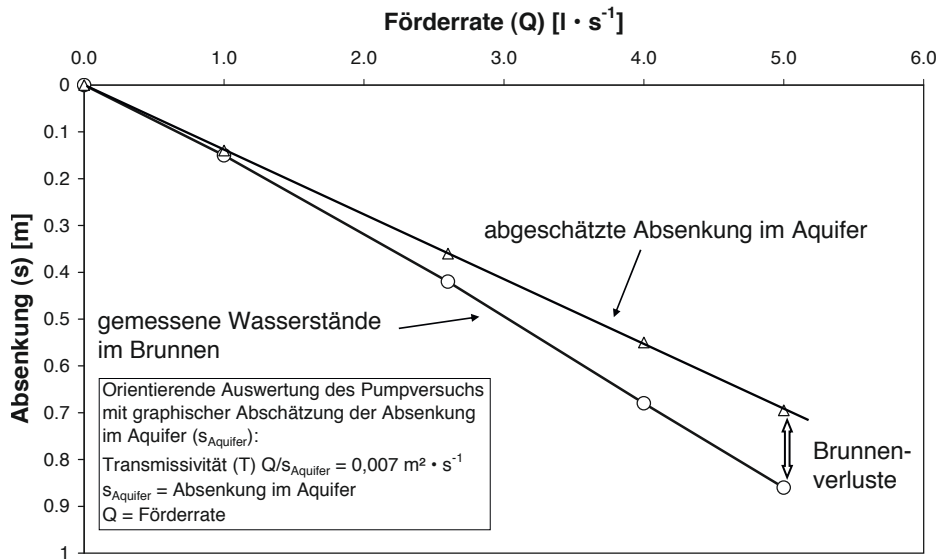
Von der zuständigen Wasserbehörde wurde bereits im Vorfeld zum Ausdruck gebracht, dass für die Erteilung einer wasserrechtlichen Erlaubnis ein auswertbarer Pumpversuch durchgeführt werden soll. Daher wurde nach dem Entsanden mit dem technischen Equipment der Bohrfirma ein Pumpversuch mit kontinuierlichen Entnahmestufen von 2,6 und 5 Liter pro Sekunde durchgeführt. Nach den jeweils vierstündigen Förderphasen wurde der Wiederanstieg über Nacht mit einer Drucksonde aufgezeichnet (Pumpversuchsdauer insgesamt 24 Stunden).

Die durchgeführten Förderraten decken den vom Wärmepumpenhersteller geforderten Leistungsbereich der Pumpe im Brunnen ab. Das Leistungsdiagramm des Brunnens (Darstellung der Absenkung versus Förderrate) ist in der Abbildung 11 dargestellt. Im Brunnen treten bei den zukünftigen Förderraten verhältnismäßig geringe Absenkungen und nur geringe Brunnenverluste auf. Durch spätere Vergleichsmessungen des Wasserstandes im Brunnen kann festgestellt werden, ob verstärkte Brunnenalterungsprozesse ablaufen (d.h. Verstärkung der Absenkung, z.B. durch Ablagerungen im Brunnen). Der Brunnen hat somit einen technisch guten Anschluss an den Grundwasserleiter und es treten keine zusätzlichen Kosten durch verstärkte Hebearbeit der Pumpe auf (hier keine Verminderung der Jahresarbeitszahl). Beim zukünftigen Brunnenbetrieb mit z.B. 1,5 Liter pro Sekunde ist nur mit geringen Absenkungen von ca. 0,25 m im Brunnen zu rechnen.

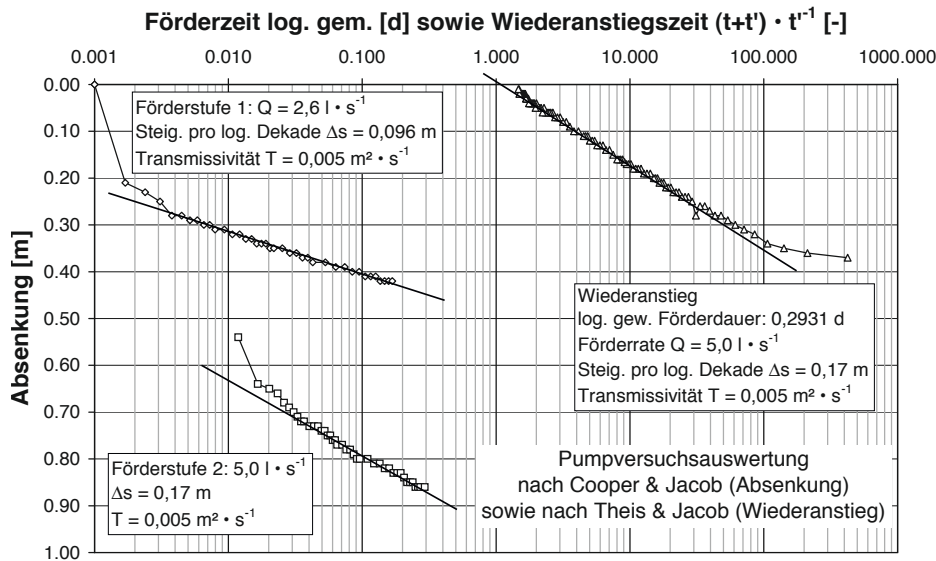
Abbildung 11: Dokumentation des Pumpversuchs



a: Darstellung von Förderrate und Wasserstand im Brunnen (aufgezeichnet mit Drucksonde)



b: Darstellung von Absenkung versus Förderrate („Leistungsdiagramm“ des Brunnens) mit orientierender Pumpversuchsauswertung



c: Darstellung der Absenkung während der Förderstufen und des Wiederanstiegs in halblogarithmischem Maßstab mit detaillierter Auswertung des Pumpversuchs

Der Verlauf des Wasserstands während des Pumpversuchs zeigt bei linearer Darstellung auch bei der hohen Pump-rate mit 5 Liter pro Sekunde eine zunehmende Abflachung, was auf einen nachhaltigen Grundwasserzustrom hinweist (Abb. 11a).

Der Pumpversuch wurde orientierend anhand des Q/S-Verhältnisses ausgewertet (z.B. in: LANGGUTH & VOIGT, 2004), wobei anhand der verschiedenen Förderstufen die jeweilige Absenkung im Aquifer abgeschätzt wurde. Dieses Näherungsverfahren liefert eine Transmissivität des Aquifers von $T = 0,007 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Abb. 11b).

Die detaillierte Pumpversuchsauswertung (z.B. KRUSEMAN & DE RIDDER, 1994) erbringt hier eine sehr gut abgesicherte Transmissivität von $T = 0,005 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ für den Brunnenstandort (Abb. 11c).

Aus der Transmissivität kann nun die Durchlässigkeit des Grundwasserleiters am Brunnenstandort berechnet werden.

Die Aquifermächtigkeit beträgt im vorliegenden Fall 15-25 m, wovon der Entnahmebrunnen nur die oberen 10 m erschließt (erschlossene Aquifermächtigkeit $m = 10 \text{ m}$). Es handelt sich somit um einen unvollkommenen Brunnen und es ist mit vertikalen Fließkomponenten im Aquifer zu rechnen, die aber im hier vorliegenden Beispiel wegen der abnehmenden Durchlässigkeit des Grundwasserleiters mit zunehmender Tiefe vernachlässigt werden. Unter Ansatz der erschlossenen Aquifermächtigkeit von 10 m berechnet sich die Durchlässigkeit zu $k_f = 0,0005 \text{ m s}^{-1}$ ($k_f = T/m$) bzw. $k_f = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$.

Die für den individuellen Brunnenstandort bestimmte Durchlässigkeit liegt im oberen Bereich der für diesen Standort dokumentierten Literaturangaben ($k_f = 0,1 \text{ bis } 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$). Der Aquifer kann nach der VDI 4640 als stark durchlässig charakterisiert werden.

Der hydraulische Gradient ist wegen der randlichen Lage im Aquifer mit $i = 0,015$ vergleichsweise hoch. In Zusammenhang mit der hohen Durchlässigkeit und dem angenommenen Hohlraumanteil von 15 % berechnen sich Abstandsgeschwindigkeiten von zirka 4 Meter pro Tag (Gleichungen 5 und 6).

Tabelle 8: Hydraulische Berechnung von Entnahme- und Rückgabeparabel (Werte gerundet)

	EINHEIT	FORMEL	MITTLERE JAHRESENTNAHME	LASTFALL WINTERBETRIEB
Entnahmerate (Q)	[l s ⁻¹]		0,3	0,6
Entnahmebreite (B)	[m]	$B = \frac{Q}{T \cdot l}$	4	8
Entnahmebreite auf Brunnenhöhe (b)	[m]	$b = B/2$	2	4
untere Scheitelung (s _u)	[m]	$s_u = b/\pi$	0,6	1,3
Abstandsgeschwindigkeit (v _a)	[m d ⁻¹]	$v_a = (k_f \cdot i)/n$	4,3	4,3

Berechnungen durchgeführt für:

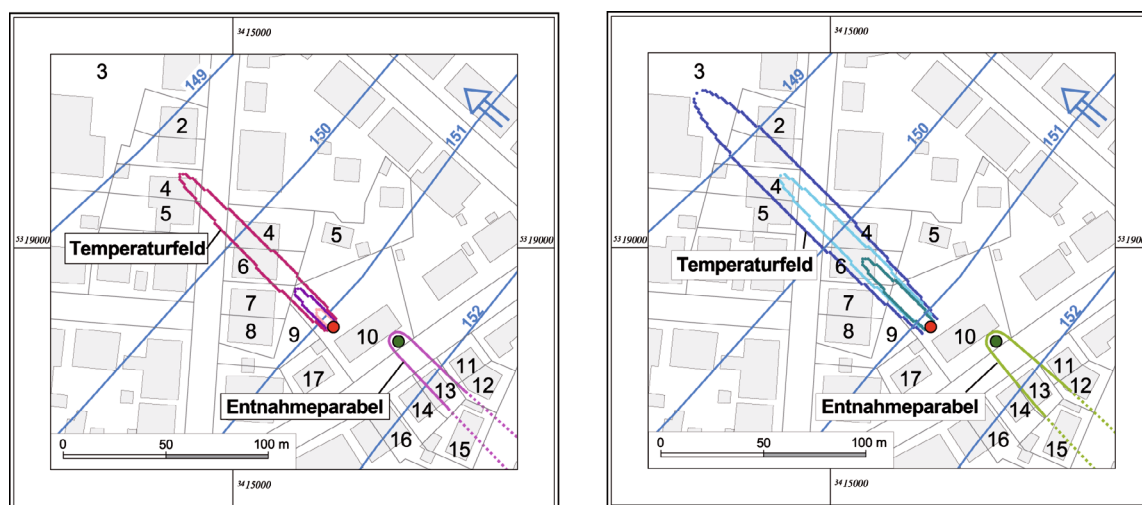
- Durchlässigkeit $k_f = 0,0005 \text{ m s}^{-1}$
 - Aquifermächtigkeit $m = 10 \text{ m}$
 - hydraulischer Gradient $i = 0,015$
 - durchflußwirksamer Hohlraumanteil $n = 0,15$
- $\pi = 3,14$

Die mittlere Grundwasserfließrichtung ist nach Nordwesten ausgerichtet, die Variationen der Grundwasserfließrichtung sind hier nach vorhandenen Erfahrungswerten nur sehr gering und können vernachlässigt werden.

Auf der Grundlage der mittleren Jahresentnahmerate von 0,3 Liter pro Sekunde berechnet sich eine Entnahmebreite von zirka 4 m, für den Lastfall von zirka 8 m. Die unterstromige Scheitelung des Brunnens beträgt im ungünstigeren Lastfall zirka 1,5 m (vgl. Tabelle 8). Durch die Entfernung von Entnahme- und Rückgabebrunnen von zirka 20 m ist keine gegenseitige hydraulische oder thermische Beeinflussung der Brunnen zu erwarten.

TEMPERATURFELDBERECHNUNG

Die Temperaturfeldberechnung basiert auf den Formeln 6 bis 12. Diese Formeln sind auch die Rechengrundlage für das unter www.um.baden-württemberg.de, Publikationen, Geothermie und Grundwasserschutz eingestellte Rechenprogramm. Die Ergebnisse wurden anschließend auf einem Flurstücksplan dargestellt (Abb. 12).



Legende

- | | | | |
|---|---|--|---------------------------------------|
| | Flurstück, Gebäude, Straßen | | Entnahmebrunnen (mit Entnahmeparabel) |
| 5 | Bezeichnung des Flurstücks | | Rückgabebrunnen (mit Temperaturfeld) |
| | Grundwasserhöhengleichen [m NN]
(mittlerer Grundwasserstand) | | 3°C Isotherme |
| | mittlere Grundwasserfließrichtung | | 2°C Isotherme |
| | | | 1°C Isotherme |

Abbildung 12: Temperaturfeldberechnung für die 1°C, 2°C und 3°C-Isothermen, Jahresmittelwert (links) und Lastfall Winter (rechts)

Die Querdispersivität wurde zu 0,18 m berechnet (Grenzfall, vgl. Kommentar zu Tabelle 5); dieser Wert wird sowohl für den Jahresmittelwert als auch für den Winter-Lastfall verwendet.

Die mittlere Grundwassertemperatur am Standort beträgt 10 °C; es sind jahreszeitliche Schwankungen von zirka 1-2 °C zu erwarten.

Unter Ansatz der mittleren Jahresentnahme berechnet sich die Reichweite der 1°C-Isotherme zu 113 m und der 3 °C-Isotherme zu 12 m. Die Breite des Temperaturfeldes ist mit 8 m etwas größer, als die Breite der hydraulisch berechneten Rückgabeparabel (4 m).

Für den **Lastfall Winter** ergibt sich für die 1 °C-Isotherme mit 166 m eine deutlich größere Längsausdehnung für das Temperaturfeld und mit 16 m auch eine größere Breite im Vergleich zur Berechnung mit dem Jahresmittelwert.

Das berechnete Temperaturfeld tangiert mehrere benachbarte Grundstücke. Für die Feststellung betroffener Nachbarn sind in diesem Fall die Isothermen des Lastfalls Winter relevant, da diese vergleichsweise größer sind.

Aufgrund der am Standort gegebenen Grundwassertemperatur (10 +/- 2 °C) und der Mindestanforderung der Grundwasserwärmepumpe von 7 °C ist im Einflussbereich der 3 °C- und 2°C-Isothermen der Bau und Betrieb weiterer Grundwasserwärmepumpenanlagen für Heizzwecke nicht mehr möglich.

Im weiter entfernten Temperaturfeld bis zur 1 °C-Isotherme ist der Bau weiterer Grundwasserwärmepumpenanlagen ebenfalls noch kritisch (10 +/- 2 °C - 1-2 °C), da die Mindestzulauftemperatur von 7 °C zeitweise unterschritten werden kann. Außerhalb der 1°C-Isotherme ist die Temperaturbeeinflussung mit < 1°C nur noch gering, so dass der Bau einer weiteren Grundwasserwärmepumpe gerade noch möglich wäre. Um hinsichtlich der Energieausbeute aus dem Grundwasser auf der sicheren Seite zu bleiben, müssten eventuelle zukünftige Anlagen in diesem Gebiet z.B. mit einem tieferen Entnahmebrunnen (z.B. bis zur Basis des Grundwasserleiters) ausgestattet oder für eine geringere Spreizung ausgelegt werden.

Sollte sich im Ausbreitungsgebiet des Temperaturfeldes schon eine Grundwasserwärmepumpenanlagen befinden, wäre eine Betroffenheit durch die geplante neue oberstromige Anlage zu erwarten.

Tabelle 9: Eingangsparmeter der Temperaturfeldberechnung im Beispiel

PARAMETER		DOKUMENTATION DER RECHENWERTE
Entzug an Wärmeenergie aus dem Grundwasser S [kWh a ⁻¹]	S	43.841 kWh a ⁻¹
Förderrate (Jahresmittelwert für die Temperaturfeldberechnung)	Q _{Mittel}	0,3 l s ⁻¹ (26 m ³ d ⁻¹)
Förderrate (Lastfall Winter für die Temperaturfeldberechnung)	Q _{Winter}	0,6 l s ⁻¹ (52 m ³ d ⁻¹)
Transmissivität [m ² s ⁻¹]	T	Detailauswertung (Abb. 11c): 0,005 Fachliteratur (Zitat): 0,001-0,005
Durchlässigkeit [m s ⁻¹]	k _f	0,0005 (Annahmen: Aquifermächtigkeit: 10 m Transmissivität: 0,005 m s ⁻¹)
Hydraulischer Gradient	I	aus Fachliteratur (Zitat): 0,015
mittlere Grundwasser-fließrichtung (Ruhezustand)		aus Fachliteratur (Zitat): NW
Variationen der Grundwasserfließrichtung		nicht im Detail bekannt, nach Erfahrungswerten wahrscheinlich gering
erschlossene Aquifermächtigkeit	m	10 m
durchflusswirksame (effektive) Porosität	n	15 %
Ausgangstemperatur des Grundwassers	Temp.	10,0 °C (vor Ort bestimmt)
saisonale Variation der Grundwassertemperatur		1 - 2 °C (Erfahrungswerte vor Ort)
Querdispersivität	α _r	0,18 m (berechnet gemäß Arbeitshilfe)
Retardation	R	3 (gemäß Arbeitshilfe)

ZUSAMMENFASSUNG

Das Beispiel soll aufzeigen, wie durch Dokumentation der Planungsgrundlagen und hydrogeologischen Randbedingungen die zur Abschätzung des Temperaturfelds erforderlichen Grundlagen transparent und nachvollziehbar werden. Sie erbringen auch Hinweise auf die Genauigkeit der Berechnungen des Temperaturfeldes.

Im vorliegenden Fall (ähnlich zahlreicher Fälle in der Praxis) ist die Bestimmung der Durchlässigkeit nur näherungsweise möglich, weshalb ergänzend Literaturdaten zur Plausibilitätskontrolle heranzuziehen sind.

Der berechnete Beispielfall ist rein theoretisch und verwendet eine mittlere Temperaturspreizung von 4 °C ; in der Praxis werden z.T. auch höhere Spreizungen umgesetzt. Das Beispiel zeigt, welche Unterlieger vom Temperaturfeld betroffen sind und erlaubt eine Abschätzung zum Umfang der Betroffenheit und der möglichen Konsequenzen daraus. 🐾

11 Literaturhinweise

NORMEN, REGELWERKE, LEITFÄDEN, ARBEITSRICHTLINIEN, METHODENSAMMLUNGEN

Abwassertechnische Vereinigung, *ATV-DVWK-Merkblatt 153 „Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser“* (Ausgabe Februar 2000).

ATV, Abwassertechnische Vereinigung, *A 138: „Bau und Bemessung von Anlagen zur dezentralen Versickerung von nicht schädlich verunreinigtem Niederschlagswasser“* (wurde ersetzt durch DWA A 138).

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (1997): *E1-4 Bohrlochversuche zur Gebirgsdurchlässigkeit* In: *GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten*. Aktuelle Version: www.gdaempfehlungen.de

DIN 18130-2:2003-10 **Baugrund**, *Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes – Teil 2: Feldversuche* [Entwurf].

DIN 18299: 2006-10 **VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Allgemeine Regelungen für Bauarbeiten jeder Art.**

DIN 18302: 2006-10 **VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Arbeiten zum Ausbau von Bohrungen.**

DIN 38402-13:1985-12 **Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Allgemeine Angaben (Gruppe A); Probenahme aus Grundwasserleitern (A 13).**

DIN 4022-1 1987-09 (A) **Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und im Fels** [zurück gezogene Norm].

DIN 4022-2 1981-03 (A): **Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen im Fels (Festgestein)** [vorgesehener Ersatz durch DIN EN ISO 22475-1 2004-08].

DIN 4023 1984-03 (A): **Baugrund- und Wasserbohrungen; Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse** [aktualisierte Ausgabe: DIN 4023: 2006-02 **Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse von Bohrungen und sonstigen direkten Aufschlüssen**].

DIN 4943: 2005-12: **Zeichnerische Darstellung und Dokumentation von Brunnen und Grundwassermessstellen.**

DIN 50930-6: 2001-08: **Korrosion der Metalle – Korrosion metallischer Werkstoffe im Innern von Rohrleitungen, Behältern und Apparaten bei Korrosionsbelastung durch Wässer – Teil 6: Beeinflussung der Trinkwasserbeschaffenheit.**

DIN 8901: 2002-12: **Kälteanlagen und Wärmepumpen: Schutz von Erdreich, Grund- und Oberflächenwasser – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen und Prüfung.**

- DIN EN 378-1: 2000-09: *Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen* – Teil 1: *Grundlegende Anforderungen, Definitionen, Klassifikationen und Auswahlkriterien*; Deutsche Fassung EN 378-1:2000.
- DIN EN ISO 14688-1: 2003-01: *Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden* – Teil 1: *Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1: 2002)*; Deutsche Fassung EN ISO 14688-1:2002.
- DIN EN ISO 14689-1: 2004-04: *Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels* – Teil 1: *Benennung und Beschreibung (ISO 14689-1: 2003)*; Deutsche Fassung EN ISO 14689-1:2003.
- DIN EN ISO 22475-1:2007-01 (D), *Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Probenentnahmeverfahren und Grundwassermessungen* – Teil 1: *Technische Grundlagen der Ausführung (ISO 22475-1:2006)*; Deutsche Fassung EN ISO 22475-1:2006.
- DIN EN ISO 5667-1, April 2007, *Wasserbeschaffenheit – Probenahme* – Teil 1: *Anleitung zur Erstellung von Probenahmeprogrammen und Probenabmetechiken (ISO 5667-1:2006)*; Deutsche Fassung EN ISO 5667-1:2006.
Hinweis: Detaillierte Anweisungen für besondere Probenahmegegebenheiten sind nicht enthalten; diese sind Bestandteil der verschiedenen Teile von ISO 5667.
- DVGW W 111: 1997-03: *Planung, Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen bei der Wassererschließung.*
- DVGW W 116: 1998-04: *Verwendung von Spülmittelzusätzen in Bohrspülungen bei Bohrarbeiten im Grundwasser.*
- DVGW W 119: 2002-12: *Entwickeln von Brunnen durch Entsandern – Anforderungen, Verfahren, Restsandgehalte.*
- DVGW W 120: 2005-12: *Qualifikationsanforderungen für die Bereiche Bohrtechnik, Brunnenbau und Brunnenregenerierung.*
- DVGW W 122: 1995-08: *Abschlußbauwerke für Brunnen der Wassergewinnung.*
- DVGW W 123: 2001-09: *Bau und Ausbau von Vertikalfilterbrunnen.*
- DVGW-Merkblatt W 112 (1983): *Entnahme von Wasserproben bei der Wassererschließung.*
- DVWK Merkblatt 128 (1992): *Entnahme und Untersuchungsumfang von Grundwasserproben.*
- DVWK Schriften 107 (1994): *Grundwassermessgeräte.*
- DWA, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Arbeitsblatt DWA-A 138 „*Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser*“ (Ausgabe April 2005).
- LAWA, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (1979): *Pumpversuche in Porengrundwasserleitern* – Arbeitsblatt 1979 (Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Umwelt Baden-Württemberg Stuttgart).
- LAWA, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (1980): *Grundlagen zur Beurteilung des Einsatzes von Wärmepumpen aus wasserwirtschaftlicher Sicht.*
- LAWA, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (1987): *Richtlinien für Beobachtung und Auswertung, Teil 2 – Grundwassertemperatur.*
- LfU, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1991): *Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit.* – Materialien zur Altlastenbearbeitung (Karlsruhe).

LfU, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1995): Methodensammlung Teil 1: *Methoden zur Grundwassererkundung*. – Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle (Karlsruhe).

ÖWAV-Regelblatt 207-2 (Entwurf 2008): *Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds, Heizen und Kühlen*.

prEN 12502-1: 2004-08 *Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe – Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und -speichersystemen – Teil 1: Allgemeines*.

prEN 12502-2: 2004-08 *Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe – Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und -speichersystemen – Teil 2: Einflussfaktoren für Kupfer und Kupferlegierungen*.

prEN 12502-4: 2004-08 *Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe – Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und -speichersystemen – Teil 4: Einflussfaktoren für nichtrostende Stähle*.

Umweltministerium Baden-Württemberg (2005): *Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden*, Stuttgart.

Umweltministerium Baden-Württemberg (2009): *Leitfaden Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen*, Stuttgart.

Umweltministerium Baden-Württemberg (2008): *Leitfaden zur Nutzung der Erdwärme mit Erdwärmekollektoren*, Stuttgart.

VDI 4640 Blatt 1: 2000-12: *Thermische Nutzung des Untergrundes – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte* [wird derzeit überarbeitet].

VDI 4640 Blatt 2: 2001-09: *Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen* [wird derzeit überarbeitet].

Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (2006): *Energie sparen durch Wärmepumpenanlagen*, Stuttgart.

GESETZE, VERWALTUNGSVORSCHRIFTEN, VERORDNUNGEN

BBodSchV, Bundesbodenschutzgesetz vom 17. März 1998 mit der Verordnung zur Durchführung des Bundesbodenschutzgesetzes (Bodenschutz- und Altlastenverordnung).

WHG, Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz), „*Wasserhaushaltsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 19. August 2002 (BGBl. I S. 3245)*, zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 10. Mai 2007 (BGBl. I S. 666)“.

VwV, *Gemeinsame Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Umwelt und Verkehr und des Sozialministeriums über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen vom 16.09.1993 in der Fassung vom 1.03.1998*.

WG, Wassergesetz für Baden-Württemberg, vom 20. Januar 2005 (GBl. S. 219), zuletzt geändert durch Artikel 33 der Verordnung vom 25. April 2007 (GBl. Nr. 9, S. 252), in Kraft getreten am 16. Juni 2007.

FACHLITERATUR UND BERICHTE (AUSWAHL)

- Cathomen, N. (2002): *Auswirkungen von Wärmepumpenanlagen auf die Grundwassertemperatur am Beispiel der Gemeinde Altsch im Vorarlberger Rheintal*; Diplomarbeit ETH Zürich im Wintersemester 2001/2002, Betreuung Prof. Fritz Stauffer und Prof. Wolfgang Kinzelbach; Zürich.
- Eberhard, M. (2004): *Wärmepumpen-Anlage „Pfarrhaus Bremgarten“*, Zweijährige Erfolgskontrolle (Messkampagne), www.eberhard-partner.ch/publikationen.html.
- Eberhard, M. (2004): *Wärmepumpen-Anlage Feuerwehrmagazin und Wohnungen Sisseln*, Zweijährige Erfolgskontrolle (Messkampagne), www.eberhard-partner.ch/publikationen.html.
- Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, GLA (1994): *Ergiebigkeitsuntersuchungen in Festgesteinsaquiferen* (Freiburg i.Br.).
- Kinzelbach, W. (1987): *Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser*; Schriftenreihe gwf Wasser Abwasser, Band 21; München-Wien (R. Oldenbourg Verlag).
- Kobus, H. [Hrsg.] (1992): *Schadstoffe im Grundwasser* / DFG, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Band 1. Wärme- und Schadstofftransport im Grundwasser. Weinheim (VCH Verlagsgesellschaft mbH).
- Kobus, H., Mehlhorn, H. (1980): *Beeinflussung von Grundwassertemperaturen durch Wärmepumpen*, Gas- und Wasserfach gwf, 121. Jahrgang, Heft 6, S. 261-268.
- Kruseman, G.P. & de Ridder, N.A. (1994): *Analysis and evaluation of pumping test data* (2nd Ed.). ILRI Publications 47, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, Netherlands, 377 pp.
- kup, Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH (2008): *Thermische Nutzung von Grundwasser durch Wärmepumpen*, Prinzipstudie zur Berechnung von Temperaturfeldern für kleine Anlagen mit Energieentzug kleiner 45.000 kWh/Jahr für charakteristische Situationen in Baden-Württemberg.
- Langguth, H.-R. & Voigt, R. (2004): *Hydrogeologische Methoden*. Springer Verlag GmbH & Co., Berlin (2. überarbeitete und erweiterte Auflage).
- LfU, Landesanstalt für Umweltschutz (2001): *Atlas des Grundwasserzustandes in Baden-Württemberg*, Grundwasserschutz 19, Karlsruhe.
- Mehlhorn, H. (1982): *Temperaturveränderungen im Grundwasser durch Brauchwassereinleitungen*, Dissertation, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart, Heft 50, Eigenverlag, Stuttgart 1982.
- Mehlhorn, H., Spitz, K.H. & Kobus, H. (1981): *Kurzschlussströmung zwischen Schluck- und Entnahmebrunnen – kritischer Abstand und Rückstromrate*, Wasser und Boden, Heft 4, April 1981.
- Poppei, J., Mayer, G., Schwarz, R., Gorhan, H. (2005): *Groundwater Energy Designer* – ein neues, interaktives Auslegungs- und Simulationstool für die Fassung und Reinjektion von Grundwasser bei Grundwasser-gekoppelten Wärmepumpen oder Kühlanlagen; Geothermie: Synergie und Effizienz; Geoth. Jahrestagung 2005; Tagungsband 16.-17. November 2005, Unterschleissheim, 193-200.

- Poppei, J., Mayer, G., Schwarz, R. (2006): *Groundwater Energy Designer* – computergestütztes Auslegungstool zur Wärme- und Kältenutzung von Grundwasser, Vorhaben des Schweizerischen Bundesamtes für Energie 101'144; Schlussbericht 2006, Publikationsnummer 260043, 30.11.2006
(www.bfe.admin.ch/dokumentation/energieforschung, Publikationsnummer 260043)
- Poppei, J., Schwarz, R., Mayer, G. (2007): *Groundwater Energy Designer*; Geothermie. CH 17(2007) 43 S.
- Rausch, R., Schäfer, W., Therrien, R., Wagner, C. (2005): *Solute Transport Modelling*, An Introduction to Models and Solution Strategies; Berlin – Stuttgart (Gebrüder Bornträger Verlagsbuchhandlung).
- RPF-LGRB, Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (2007): *Hydrogeologischer Bau und Aquifereigenschaften der Lockergesteine im Oberrheingraben* (Baden-Württemberg). LGRB-Informationen 19, Freiburg im Breisgau.
- RPF-LGRB, Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (2008): *Hydrogeologische Einheiten in Baden-Württemberg*. LGRB-Informationen 20, Freiburg im Breisgau.
- Schmidt-Lorenz, W. (1970): *Mikrobiologische Probleme bei tiefgefrorenen und gefriergetrockneten Lebensmitteln*, Archiv. Hyg. Bakt.
- Söll, T. (1988): *Berechnungsverfahren zur Abschätzung anthropogener Temperaturanomalien im Grundwasser*; Stuttgart (Eigenverlag des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart).
- Willibald (1980): *Temperaturfelder im Grundwasser als Folge von Einleitungen erwärmten oder abgekühlten Wassers und deren Berechnung mit Hilfe analytischer Ansätze*, Heft der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe

Impressum

HERAUSGEBER:

Umweltministerium Baden-Württemberg, Kernerplatz 9, 70182 Stuttgart, Telefon 0711/126-0
Telefax 0711/126-2881, Oeffentlichkeitsarbeit@um.bwl.de, www.um.baden-wuerttemberg.de

REDAKTION:

Bauer, Michael, Dr. (Obmann)	Regierungspräsidium Freiburg (RPF), Ref. 94/ Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (RPF-LGRB),
Bendel, David	Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH (<i>kup</i>)
Eppinger, Albert	Landratsamt Rhein-Neckar-Kreis
Franßen, Wilhelm	Landratsamt Tübingen
Heinz, Michael	Landratsamt Reutlingen
Keim, Bernhard	Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH (<i>kup</i>)
Mahler, Dirk	Landratsamt Rastatt
Milkowski, Nadja	Umweltministerium Baden-Württemberg
Pasler, Udo	Umweltministerium Baden-Württemberg
Rolland, K. Martin	Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald
Schölch-Ighodaro, Roswitha	Stadt Mannheim
Stein, Ulf	Landratsamt Esslingen
Vöröshazi, Marion	Landratsamt Karlsruhe
Wingering, Michel	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

GESTALTUNG UND SATZ:

Bertleff, Michael info@michaelbertleff.de, www.michaelbertleff.de

© Umweltministerium Baden-Württemberg

1. Auflage Oktober 2009, Auflagenhöhe 100 Stück

Nachdruck und Vervielfältigung nach Genehmigung und unter Nennung des Herausgebers.



Baden-Württemberg

UMWELTMINISTERIUM